АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1. Определение автоматизированного конструкторского проектирования

Конструирование как термин относят обычно к общему понятию проектирования. Иногда говорится о проектно-конструкторских работах. Организации, занимающиеся созданием новых объектов, называют конструкторскими бюро. В ряде нормативных документов также имеет место подмена понятия «проектирование» понятием «конструирование». В определенной степени подобная идентификация терминов понятна, поскольку с конструированием связан выпуск комплекта документации, т. е. выходного продукта всей системы проектирования. Кроме того, в ряде случаев содержательная часть проектных работ связана, главным образом, с конструированием. Это имеет место, например, в ряде областей машиностроения, где геометрический облик изделия и его элементов определяет основные свойства проектируемого объекта.

При переходе к формальным методам необходима конкретизация понятия конструкторского проектирования, которое определяется как этап в проектных работах, связанный с геометрическим синтезом проектируемого объекта и оформлением документации. Задачами геометрического синтеза являются формирование оригинальных деталей, силовых и несущих конструкций, размещение элементов в сборочных конструкциях, проектирование монтажных связей, геометрического облика энергетических магистралей и т. д. Конструкторская документация, выпуском которой завершается этап конструкторского проектирования, должна быть достаточной для исполнения объекта в производстве.

Таким образом, мы дали общее определение задач конструкторского этапа проектирования любого объекта. Предметная область разрабатываемого объекта отражается при конструкторском проектировании в расчетах и соответственно математических моделях, связанных с функциональным назначением этого объекта. Последнее утверждение требует пояснения.

Каждый объект имеет свое функциональное назначение и соответственно показатели, определяющие качество функционирования. Анализу функциональных показателей и определению параметров объекта, лучшим образом отвечающих этим показателям, посвящен этап функционального проектирования. Однако существует ряд показателей, конкретных для данных классов объектов, в которых функциональные показатели зависят от выбранных конструктивных (геометрических) параметров проектируемого объекта. Так возникает связь функционального и конструкторского проектирования, которая существенно влияет на структуру САПР. В подобных ситуациях правильность выбранных конструктивных (геометрических) параметров необходимо проверять на функциональных математических моделях.

Практически для всех объектов, функционирование которых связано с распространением энергии в непрерывных средах, возникает подобная необходимость, поскольку смена геометрических параметров вызывает изменение граничных условий и соответственно параметров объекта.

В любой конструкторской задаче приходится оценивать правильность

принимаемых конструктивных решений с точки зрения самых различных функциональных показателей. Обычно эти задачи оценки объединяются общим понятием «конструкторские расчеты». Эти расчеты входят в традиционно сложившуюся технологию проектирования и определяются нормативными документами, принятыми при проектировании. Автоматизация проектирования существенно расширяет возможность подобных расчетов, заменяя их более точными методами математического моделирования.

Рассмотрим некоторые характерные примеры. При размещении и компоновке тепловыделяющих элементов (например, блоков электроаппаратуры) в шкафах требуется анализ температурных эффектов, для чего необходима функциональная модель, позволяющая рассчитать температурные поля в различных точках рассматриваемого объекта. Если этот же объект подвергается воздействию вибрации, то для анализа возникающих механических напряжений следует использовать функциональную модель, позволяющую строить поля нагрузок при различных спектрах вибрационных воздействий.

При конструировании летательного аппарата геометрическая конфигурация обводов объекта определяет его аэродинамические свойства, поэтому конструктивные параметры в данном случае следует выбирать с учетом аэродинамических показателей функциональной модели. Аналогично в задачах проектирования волноводных трактов или полосковых линий геометрические параметры определяют такие функциональные показатели, как, например, полоса пропускания высокочастотного тракта.

Здесь следует заметить, что в рассмотренных задачах превалирующее значение (как по критериям, так и по трудоемкости расчетов) имеет функциональное проектирование. Поэтому практически процесс проектирования сводится к следующей последовательности операций. На этапе функционального проектирования осуществляется выбор части геометрических (конструктивных) параметров, необходимых для удовлетворения функциональных показателей. Для конструкторского этапа эти параметры считаются фиксированными. Далее осуществляется этап конструкторского проектирования с сохранением выбранных параметров и формируется комплект документации. Сложность возникает в случае, если геометрические параметры, выбранные на этапе функционального проектирования, окажутся неприемлемыми исходя из критериев конструкторского проектирования. Тогда возникает необходимость поиска компромисса при выборе конструктивных параметров. Решение компромиссной задачи требует, в свою очередь, пересмотра ранее принятых значений геометрических параметров, т. е. повторного проведения этапа функционального проектирования.

Отметим, что функциональные показатели зависят лишь от некоторых геометрических параметров основных деталей. В процессе конструирования основная конструкция дополняется большим числом деталей, а основные геометрических параметры большим числом новых, связанных с конструктивным оформлением.

Так, при проектировании волноводных трактов на моделях функционального проектирования выбираются лишь внутренние размеры волноводов либо резонансных полостей. Конструирование же предполагает, кроме того, выбор ряда вспомогательных деталей: прокладок, фланцевых соединений, крепежа и т. д.

Другим примером может служить электрическая машина. С точки зрения ее функционирования имеют значение несколько геометрических параметров башмака и якоря, определяющих границы сред и соответственно распределение магнитных полей. При конструкторском проектировании необходим выбор большого числа деталей, свойственных машинам: валов, под-

шипников, прокладок, корпусов, крепежа и т. д.

В обоих случаях по трудоемкости и сложности создания математических моделей этап функционального проектирования является определяющим, однако основная масса конструкторских параметров и деталей, как и сама конструкторская документация, появляется при конструкторском проектировании.

2. Базовое программно-информационное обеспечение (ПИО) конструкторского проектирования

В состав ПИО конструкторского проектирования должны входить средства геометрического описания объекта, средства манипуляции с геометрическим образом, средства отображения объекта, средства формирования графической документации и средства формирования геометрической информации для обработки на станках с ЧПУ.

Ориентация ПИО конструкторского проектирования на конкретные объекты проектирования определяется в основном содержанием баз данных с описаниями элементарных объектов (деталей, сборок и т. д.) различного функционального назначения, из которых компонуются конструкции проектируемых объектов.

При конструкторском проектировании ряда объектов может потребоваться решение специфических задач анализа и синтеза, реализуемых на характерных для данных объектов моделях. К таким задачам следует отнести интересные по алгоритмическим методам задачи синтеза топологии печатного монтажа и прокладки магистралей различного типа в трехмерном пространстве. Своеобразны и специфичны задачи конструирования скульптурных поверхностей, не имеющих строго аналитического описания. Базовая часть ПИО, общая для различных объектов проектирования, должна включать следующие подсистемы:

– геометрического моделирования;
– графического отображения (визуализации);
– формирования графической документации;
– формирования данных для обработки на станках с ЧПУ.

Взаимодействие пользователя с этими подсистемами осуществляется на языке графического взаимодействия (ЯГВ), который должен обеспечивать формирование объекта, манипуляции с образованным объектом, управление процессом проектирования.

Типовая схема базового программно-информационного обеспечения конструкторского проектирования представлена на рис. 1. Схема является конкретным исполнением типовой структуры программно-информационного обеспечения. Роль проектных модулей при этом выполняют соответствующие подсистемы.

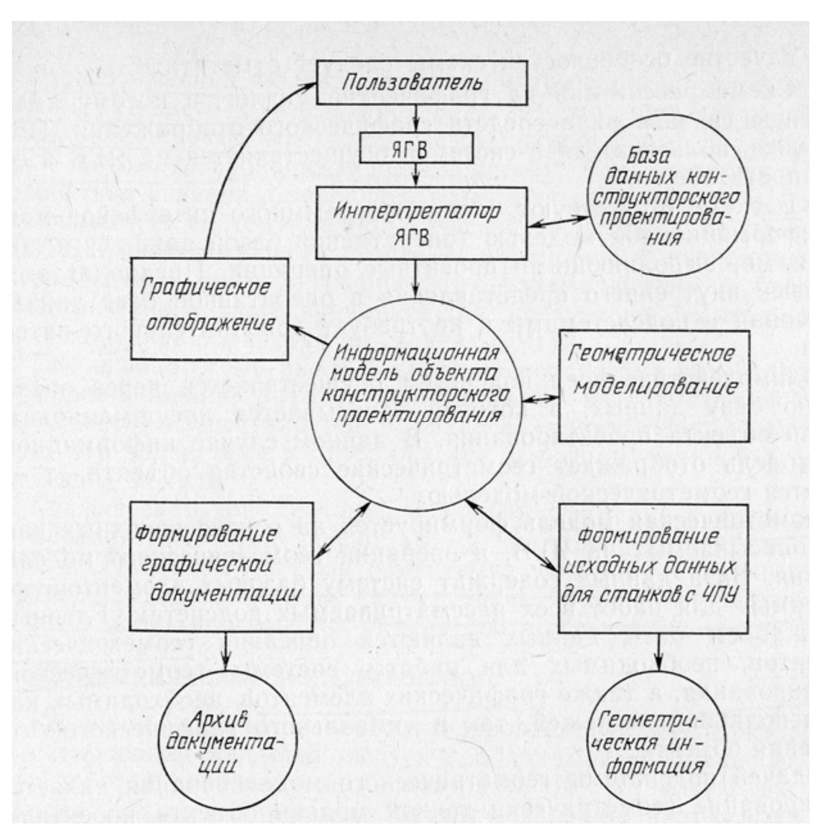


Рис. 1. Схема базового программно-информационного обеспечения конструкторского проектирования

В качестве особенностей схемы следует отметить:

Схема рассчитана на графический диалог, а потому имеет обратную связь в виде средств графического отображения. Прямая связь пользователя с системой осуществляется на ЯГВ и его интерпретаторе.

В схеме отсутствуют блоки программного интерфейса между информационной моделью (оперативной базой данных) и подсистемами, выполняющими проектные операции. Предполагается, что язык внутреннего представления в оперативной базе данныхсогласован с подсистемами и не требует дополнительного интерфейса.

Взаимодействие всех подсистем осуществляется через оперативную базу данных, в которой записывается информационная модель объекта проектирования. В данном случае информационная модель отображает геометрические свойства объекта, т. е. является геометрической моделью.

Геометрическая модель формируется на основе исходных данных описываемых на ЯГВ, и операций геометрического моделирования. База данных содержит систему базовых элементов необходимых для содержанием базы данных являются описания геометрических элементов, необходимых для работы системы геометрического моделирования, а также графических элементов, необходимых как для исполнения чертежей, так и символьного графического отображения объекта.

Задачей подсистемы геометрического моделирования является формирование геометрически точной модели объекта проектирования. Подсистема отображения данных обеспечивает визуализацию данных на графических средствах. Подсистема документирования осуществляет формирование гра-

фической документации и выдачу ее на графические исполнительные устройства (графопостроители). Подсистема формирования данных для станков с ЧПУ подготавливает геометрические данные по обрабатываемой детали для последующего выпуска технологической документации с использованием автоматизированной системы технологической подготовки производства. Язык графического взаимодействия инициирует работу любой подсистемы как в процесс выполнения проектных работ, так и при формировании баз данных.

Конструкторское проектирование объекта при отработанных базах данных осуществляется в диалоговом режиме с подсистемой геометрического моделирования с отображением результатов на графических средствах подсистемой отображения. Результатом процесса конструкторского проектирования является точная геометрическая модель объекта. На основе модели объекта формируются проекции и сечения объекта в целом и отдельных деталей, которые являются геометрической основой сборочных и деталировочных чертежей, оформляемых в подсистеме графической документации. Эта модель используется и для формирования геометрической части управляющих программ для станков с ЧПУ.

Геометрическая модель является математически точным описанием будущего объекта производства. Это обстоятельство создает возможность перехода к безбумажной форме взаимодействия с автоматизированным производством. Суть подобного взаимодействия связана с передачей геометрической модели в автоматизированную систему технологической подготовки производства (АСТПП), где осуществляется ее обработка с использованием интерактивных средств графического взаимодействия и процедур геометрического моделирования для построения геометрической части контуров обработки на станках с ЧПУ.

Головной в схеме рис. 1 является подсистема геометрического моделирования, поэтому формирование геометрической модели объекта осуществляется в диалоге «пользователь – система» через эту подсистему и отображается в информационной (геометрической) модели.

Графическая документация и данные для станков формируются соответствующими подсистемами на основе геометрической модели. При этом частные изменения, связанные с конкретными задачами подсистем, такие как размерные линии, технологические данные, могут вноситься в модели соответствующих подсистем.

3. Геометрическое моделирование

Конечной задачей неавтоматизированного конструкторского проектирования является выпуск необходимой совокупности конструкторской документации, основу которой составляют все виды чертежей по проектируемому объекту, включая чертежи на сборочные единицы и деталировочные чертежи. По этой документации в производстве восстанавливается пространственный (геометрический) образ объекта или детали и осуществляется его создание. Таким образом, конструктор, создавая (проектируя) геометрическую

модель объекта, далее отображает ее в плоских проекциях (чертежах), а исполнитель детали (объекта) по этим чертежам восстанавливает пространственную модель объекта и осуществляет его изготовление.

С появлением станков с ЧПУ способ взаимодействия с производством видоизменился, но при этом традиционно сложившийся процесс конструкторского проектирования остается неизменным. Чертеж как основной документ сохраняется, но уже интерпретируется разработчиком технологической управляющей программы для станка с ЧПУ. Такой процесс практически не реализует огромные возможности вычислительной техники по решению пространственных задач геометрии.

Система геометрического моделирования (СГМ) призвана видоизменить этот традиционно сложившийся процесс. В СГМ конструктор оперирует непосредственно пространственными моделями проектируемого объекта и может обеспечить принципиально новые формы интерфейса с автоматизированным производством на основе объемного геометрического образа объекта проектирования.

Для СГМ можно выделить следующие основные группы проектных процедур:

1. Синтез геометрической структуры (модели) проектируемогообъекта на основе геометрических примитивов.

2. Манипуляции с геометрическими параметрами объекта заданной структуры.

3. Компоновка и размещение заданного набора элементов взаданном пространстве.

4. Геометрический анализ.

5. Формирование геометрических заготовок для подсистем отображения, выпуска графической документации и АСТПП.

Так как конструирование является синтетическим процессом, то моделирование как средство анализа несколько неточно отражает существо рассмотренных процедур. Поэтому геометрическое моделирование следует понимать как создание (синтез) геометрической модели (структуры) объекта. В такой интерпретации понятие «геометрическое моделирование» является наиболее полным. Это понятие не исключает моделирование как средство анализа принимаемых решений и вместе с тем определяет конечную задачу СГМ.

Кроме того, поскольку формирование структуры является диалоговой процедурой, то геометрическое моделирование в процессе автоматизированного конструкторского проектирования следует понимать как интерактивный синтез (формирование) геометрической модели (структуры) объекта проектирования, выполняемый в базисе СГМ.

Состав базиса геометрического моделирования определяется конкретной задачей геометрического моделирования. В развитых средствах конструкторского проектирования базис является многоуровневым. На нижнем уровне находятся аналитически или таблично заданные носители геометрической информации – примитивы геометрического моделирования. Элемен-

ты базиса более высоких уровней иерархии строятся на основе этих примитивов путем объединения их в геометрические структуры и образования элементов (деталей) любой сложности. Каждый элемент базиса любого уровня имеет свой идентификатор (имя), и из него может компоноваться объект проектирования.

Геометрическое моделирование классифицируется по принципу моделирования плоских (двумерных) и объемных (трехмерных) объектов. Промежуточным является вариант так называемого двусполовиномерного объекта. По математическому аппарату описания и методам исследования он близок к двумерным объектам. Существо подобных объектов заключено в наличии третьей координаты – глуби ны объекта. При этом все сечения, перпендикулярные третьей оси, имеют одинаковую конфигурацию. Простейшими примерами указанных объектов могут быть окружность, цилиндр и шар (рис. 2).

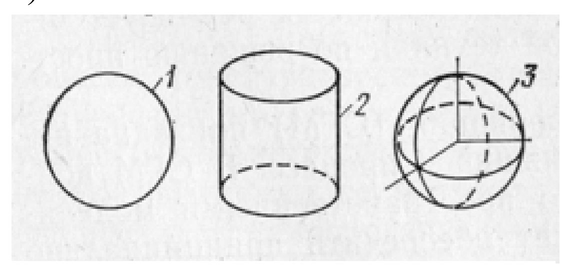


Рис. 2. Двумерный *1*, двухсполовиномерный *2* и трехмерный *3* объекты проектирования

Отображение двумерных объектов однозначно определяется одной проекцией на плоскость. При этом поскольку двумерный объект является плоским, то проекция есть, по сути, геометрическая модель объекта. Для двусполовиномерных объектов в принципе нужны две проекции, последняя, однако, может заменяться размерами по третьей оси. Трехмерные объекты требуют, как правило, отображения в трех проекциях. При сложных конфигурациях трехмерный объект в чертежах снабжают также рядом характерных сечений и разрезов.

Соответственно характеру объекта проектирования меняется состав примитивов базиса геометрического моделирования. Для двумерных объектов подобными примитивами являются линии различного типа: прямые, аналитически определенные кривые, лекальные кривые, задаваемые таблично либо композицией аналитических кривых (сплайнами). Для трехмерных объектов примитивами геометрического моделирования являются поверхности различного типа: плоскости, аналитически заданные криволинейные поверхности, скульптурные поверхности, задаваемые таблично и т. д.

4. Геометрическое моделирование двумерных объектов

4.1. *Процедуры синтеза геометрической структуры*

В результате геометрического моделирования плоских объектов формируются плоские фигуры, состоящие из отрезков кривых, носителями которых являются примитивы (рис. 3).

Задачами процедур геометрического моделирования является определение границ (точек) каждого отрезка. Эти границы (точки) могут задаваться принудительно (координатами) в исходном описании объекта либо вычисляться в результате выполнения процедур.

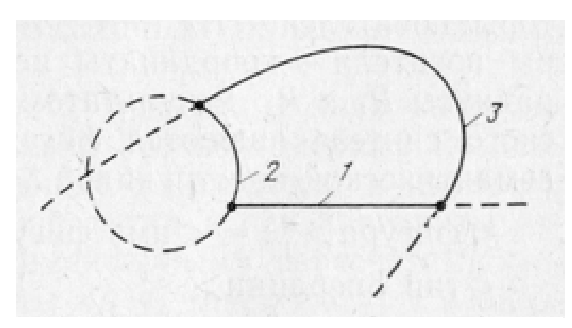


Рис. 3. Плоская фигура, образованная пересечением трех носителей: прямой *1*, окружности *2*, параболы *3*

Следует отметить неоднозначность решения задач формирования геометрической структуры. Два носителя H_1 и H_2 типа окружности с радиусами R_1 и R_2, имеющие два пересечения в точках A и B (рис. 4, *а*), могут образовывать фигуры, изображенные на рис. 4, *б–д*.

При назначении на носителях начальных и конечных граничных точек для фигуры, изображенной на рис. 5, *а*, возможно образование двух новых плоских фигур (рис. 5, *б* и *в*).

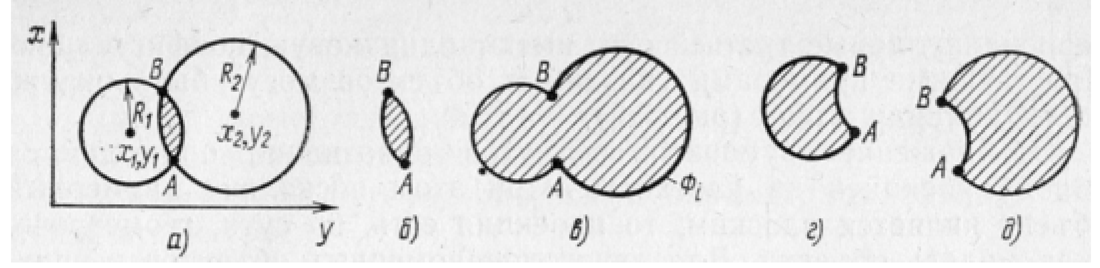


Рис. 4. Примеры неоднозначности решения задачи синтеза геометрической структуры

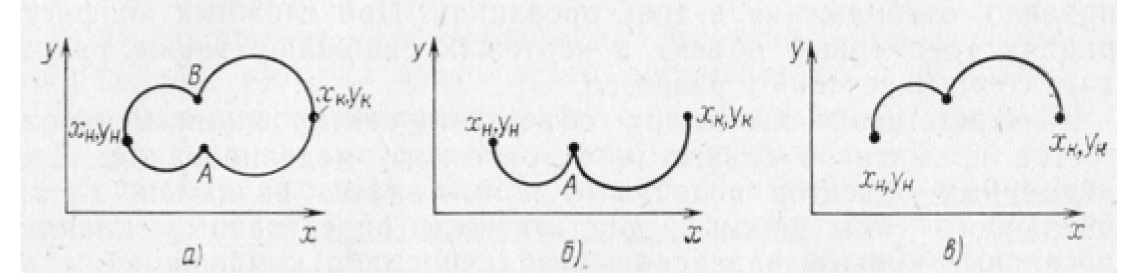


Рис. 5. Варианты новых фигур (*б* и *в*), образованных при задании граничных точек $x_н y_н$, $x_к y_к$

Языки, описывающие геометрическую конструкцию, должны содержать операторы геометрического синтеза фигуры Φ на основе геометрических примитивов — носителей H:

$$\Phi = \Gamma(H_1, H_2, \ldots, H_i). \tag{4.1}$$

В (4.1) Г – операция геометрического синтеза, которая аналогична операциям теории множеств. Базисом таких операций являются операции пересечения, объединения и вычитания. На основе базисных операций могут составляться более сложные процедуры геометрического синтеза. Заметим, что операции геометрического синтеза (4.1) могут осуществляться на более сложных образованиях, т. е. на синтезированных ранее фигурах.

Носители H в металингвистической форме определяются в виде

<носитель> ::= <имя носителя> <тип носителя><параметры носителя>. (4.2)

Для рассматриваемого случая рис. 4, *а* (имена) идентификаторы носителей – H_1 и H_2, тип носителя — окружность, параметры носителя – координаты центров окружностей x_1, y_1; x_2, y_2 и радиусы R_1 и R_2. Результатом выполнения процедуры геометрического синтеза являются фигуры (рис. 4, *б–д*), представленные семантической конструкцией

<фигура> ::= <имя фигуры> <H_1> <H_2><тип операции>. (4.3)

Здесь H_1 и H_2 являются операторами ссылки на их полные описания (4.2). Имена фигур – Φ_i, $i = 1\div4$, которые синтезируются в соответствии с типом операции. Далее фигуры могут быть модифицированы путем задания граничных точек, определяемых парами координат и направлениями обвода (рис. 5).

Конечным результатом операции синтеза плоской фигуры на основе примитивов системы геометрического моделирования должна быть семантическая конструкция, состоящая из упорядоченного списка отрезков, выполненных на носителях:

<объект проектирования> ::= <имя объекта>{<отрезок>};

<отрезок> ::= <тип носителя><параметры носителя><координаты границ> <направление обвода>. (4.4)

Здесь и далее { } – многократно повторяющаяся упорядоченная семантическая конструкция (кортеж).

Некоторые элементы конструкции были пояснены выше. Элемент <координаты границ> – пары *xy* начала и конца отрезка. Элемент <направление обвода> – некоторый идентификатор, определяющий правило выделения из носителя той или иной части.

Семантическая конструкция (4.4), описывающая плоский объект в виде набора соответствующих отрезков, является достаточно общей. В подобной форме семантическая конструкция уже является информационной (в данном случае геометрической) моделью объекта, записываемой в оперативную базу данных как результат проектных работ. Над этой моделью далее совершаются операции, такие как формирование документации и информации для обработки в производстве. Первоначально отдельные позиции в этой конструкции могут быть пустыми, и задача проектных процедур синтеза фигуры заключается в их заполнении.

Предложенная схема синтеза плоской геометрической фигуры не единственная. Возможны и другие варианты. В интерактивных диалоговых режимах практически может синтезироваться любой реквизит (позиция) конструкции (4.4).

4.2. *Процедуры манипуляции*

Изменение геометрических параметров объекта без изменения его топологических свойств, определяемых семантической структурой (4.4), осуществляется процедурами манипуляции. В их состав входят две основные процедуры афинных преобразований: поворот координатных осей и перенос начала координат объекта в новую точку.

На рис. 6 базовая точка объекта *Б* имела в начальном положении координаты 0, 0 относительно базовой системы координат и оси координат x, y, совпадающие с базовыми; в конечном положении координаты x_0, y_0 базовой точки и оси повернуты относительно базовых на угол α. Элементарными пересчетами могут быть получены новые координаты x'_i, y'_i точек фигуры в базовой системе координат.

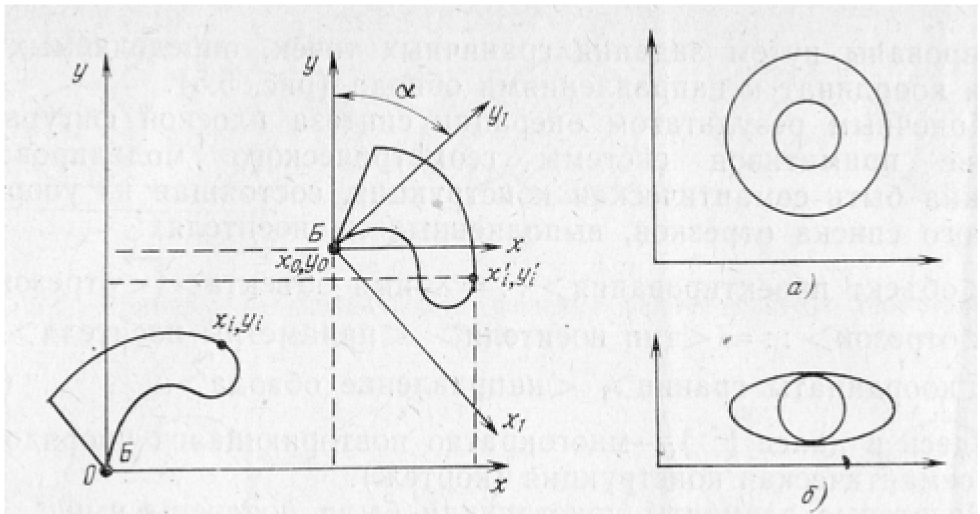


Рис. 6. К процедурам переноса и поворота осей плоских фигур

Рис. 7. К процедуре масштабирования плоской фигуры по двум осям (*а*), по одной оси (*б*)

Другой процедурой манипуляции является процедура масштабирования, т. е. изменения масштабов вдоль осей. Строго говоря, процедура манипуляции не затрагивает структуры объекта в случае, когда масштаб изменяется одновременно по всем осям (рис. 7, *а*). Если же фигура вытягивается только вдоль одной оси либо несимметрично по осям, то произойдет изменение типа носителя. Последнее приведет к структурным нарушениям, поскольку кривая одного типа заменяется другой (рис. 7, *б*). Например, при растягивании окружности по одной оси она модифицируется в эллипс.

4.3. *Процедуры размещения и компоновки*

Рассматриваемая задача состоит в размещении группы конструктивно оформленных элементов, имеющих определенную геометрическую форму, в заданном объеме или на плоскости. Как любые процедуры синтеза, процедуры компоновки и размещения должны иметь систему варьируемых параметров и критериальных показателей. К компоновке следует отнести процедуры, в которых и параметры, и показатели имеют чисто геометрическое толкование. Это, по сути, размещение, удовлетворяющее габаритным ограничениям. В задачах размещения оценочными критериями могут быть самые различные показатели, в том числе и функциональные.

Для двумерных объектов задача компоновки может считаться формально разрешимой на основе алгоритмических методов. Что касается задачи размещения, то ее решение связано с необходимостью учета ряда дополнительных критериев. Размещение является тем самым случаем, когда конструкторское проектирование входит в контакт с функциональным. Если к тому же оценочные критерии связаны с неформальными понятиями, такими, например, как эстетика интерьера, то, естественно, выбор решений не является чисто формальной процедурой.

Рассмотрим некоторые возможные варианты решения задач компоновки и размещения при геометрическом моделировании. Простейшим вариан-

том является процедура мультипликации. Аппарат этой процедуры автоматически многократно повторяет объект с заданным шагом размещения в различных точках несущей конструкции или чертежа. Здесь регулирующими параметрами являются шаг и число мультипликации.

К этому же классу задач относится размещение электрорадиоэлементов (ЭРЭ) на плате, ячеек в блоке, блоков в шкафу, размещение станочного оборудования в цехе. Критериями решения таких задач кроме чисто геометрических являются суммарные длины магистралей. По содержанию алгоритма аналогична задача раскроя, связанная с размещением выкроек на исходном листе заготовки материала. Эта задача чисто компоновочная, поскольку показатели связаны с габаритными ограничениями.

4.4. *Процедуры геометрического анализа*

Рассмотренные выше процедуры относились к группе синтетических, поскольку в результате их действия либо создавалось геометрическая структура объекта, либо выбирались его геометрические параметры. Остановимся на некоторых аналитических процедурах, которые решаются при геометрическом моделировании плоских объектов.

Вопросы анализа возникают в любой из рассмотренных выше проектных задач. Если геометрические параметры оригинального плоского объекта, представленные в (4.4), выбраны разработчиком, то проверка корректности этих решений является задачей анализа. Например, если вручную заданы параметры носителей и границы отрезков, то задание является избыточным и ряд точек может быть проконтролирован на их взаимное соответствие. В этой же задаче состав параметров может быть неизбыточным, а контроль корректности заключается в определении точек пересечения двух носителей. Поскольку контур объекта должен быть непрерывным, то отсутствие пересечений говорит о некорректности исходного задания.

В задачах размещения проверка корректности связана с контролем непересечения элементов либо выходов их за габариты несущей конструкции. Аналогичен по смыслу контроль задачи раскроя материала. К этой группе процедур анализа примыкают процедуры геометрических контрольных расчетов. Главное их содержание в плоских задачах связано с расчетами расстояний от точки до точки, от точки до прямой или минимального расстояния от фигуры до другой фигуры.

К процедурам анализа относятся также процедуры расчета площади фигуры, ее моментов инерции, массы и т. д.

Процедуры формирования геометрических заготовок следует рассматривать в СГМ, поскольку они являются общими для систем подготовки графической документации, отображения и выпуска управляющих программ для станков с ЧПУ. Задача формирования подобных заготовок характерна для объемных фигур, и ее рассмотрение будет проведено ниже.

5. Геометрическое моделирование трехмерных объектов

5.1. *Процедуры синтеза геометрической структуры*

Построение геометрического образа трехмерного объекта проектирования является одной из наиболее сложных задач автоматизированного конструкторского проектирования. Отметим некоторые особенности рассматриваемой задачи. Геометрический образ должен быть точным, т. е. должен быть описан либо в форме аналитических выражений, либо таблично с погрешностью, не превышающей погрешности механической обработки объекта. Форма описания должна быть достаточно компактной, т. е. по объему занимаемой памяти не превышать определенных требований, существующих в системе проектирования. Способ описания объекта должен обеспечить всевозможные операции над моделью объекта, необходимые для ее отображения в графической форме на экранах дисплеев и на чертежах. Содержание геометрической информации должно быть достаточным для подготовки данных для станков с ЧПУ.

Указанные особенности являются, по сути, требованиями, определяющими форму конечного представления информационной модели объекта, полученной в результате синтетических процедур.

Одной из компактных и точных форм представления объекта является его описание в виде совокупности граней. Каждая из граней при этом задается аналитически в виде образующей поверхности (носителя) и совокупности ребер (гирлянд), обрамляющих эту грань (рис. 8).

Элементарным объектом проектирования является деталь, представляющая собой неразъемную трехмерную фигуру, имеющую неразрывную наружную поверхность. Деталь является основой любого объекта конструкторского проектирования. Болеесложные конструкции образуются компоновками отдельных деталей.

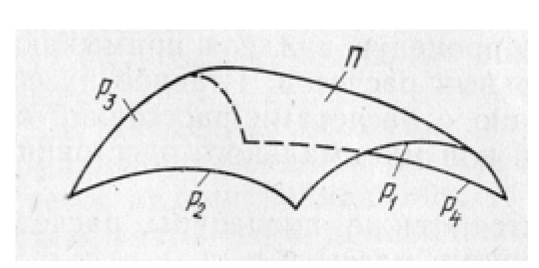


Рис. 8. Грань: *П* – поверхность носителя; P_i – обрамляющие ребра

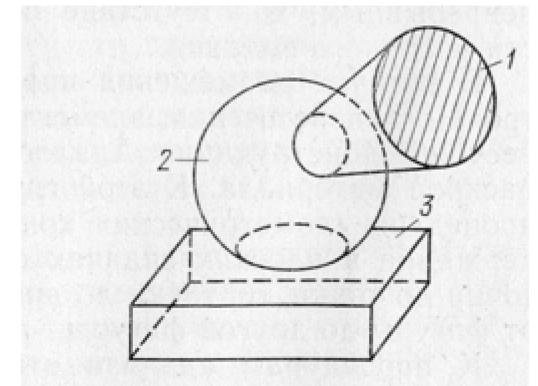


Рис. 9. Пример детали, образованной пересечением конуса *1*, шара *2* и параллелепипеда *3*

Каждая такая деталь может образовываться на основе элементарных геометрических фигур (рис. 5.9), состоящих, в свою очередь, из совокупности поверхностей. Таким образом, деталь в итоге может быть представлена в виде совокупности соприкасающихся граней. Деталь в этом смысле является структурой, элементами которой являются поверхности, а геометрические связи между элементами определяются совокупностью ребер.

Геометрическая модель детали по аналогии с (4.4) может быть записана в виде лингвистической конструкции

$$\langle\text{деталь}\rangle ::= \{\langle\text{грань}\rangle\}, \qquad (5.1)$$

т. е. деталь в итоге представляется совокупностью граней. В свою очередь,
<грань> ::= <поверхность> {<ребро>}<область определения поверхности>. (5.2)

Выражение (5.2) формализует положение, согласно которому каждая грань описывается поверхностью и совокупностью обрамляющих ребер. В этом выражении конструкции <область определения поверхности> необходима для ликвидации неопределенности, т. е. определения той части поверхности, которую выделил конструктор. Задачу ликвидации неопределенности можно решать по-разному. Напомним, что синтез детали является структурным синтезом и решается в режиме диалога, поэтому не исключено активное участие человека в задаче выделения нужной области.

Поясним на примере детали, представленной на рис. 9, способы формирования информационной (геометрической) модели. Деталь состоит из совокупности трех геометрических фигур: конуса, шара и параллелепипеда, объединенных между собой операциями геометрического синтеза:

$$<\Phi> = \Gamma(\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3). \qquad (5.3)$$

В (5.3) Γ – оператор геометрического синтеза, аналогичный (4.1); Φ_1 Φ_2, Φ_3 – исходные фигуры (конус, шар, параллелепипед); Φ – вновь образованная фигура — деталь.

Конус образуется двумя поверхностями: конической и плоскостью (рис. 10, *а*). Плоскость *2* перпендикулярна оси конуса и находится на расстоянии H от его вершины. Конус — круглый, т. е. имеет в основании круг. Центральный угол конуса $\varphi_к$. В общей системе отсчета $0xyz$ вершина $0_к x_к$ имеет координаты $x_к$, $y_к$, $z_к$. Направляющие углы $\alpha_к$, $\beta_к$, $\varphi_к$ оси конуса $0_к x_к$ показаны на рис. 10, *б*.

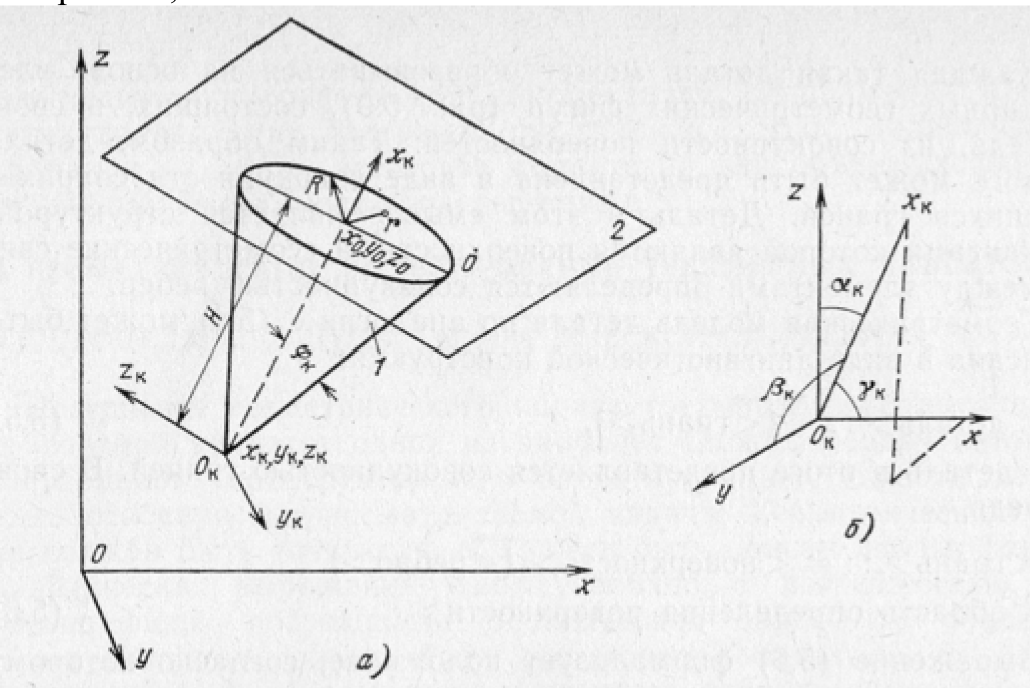


Рис. 10. Конус, образованный конической поверхностью *1* и плоскостью *2* (*а*) и система координат конуса (*б*)

Формально семантика конуса может быть записана согласно (5.1) в виде двух граней:

<конус> ::= <коническая грань> <плоская грань>,

где согласно (5.2)

<коническая грань> ::= <коническая поверхность (КП)> <параметры КП> <ребро КП> <область определения КП>;

<плоская грань> ::= <плоскость (П)> <параметры П> <ребро П> <область определения П>.

Здесь <коническая поверхность (КП)> и <плоскость (П)> – имена носителей.

<параметры КП> ::= <$x_к$, $y_к$, $z_к$, $\alpha_к$, $\beta_к$, $\varphi_к$, $\gamma_к$>;

<ребро КП> ::= <окружность (О)> <параметры О> <направление обвода> <координаты границ>.

Конструкция <ребро КП> – окружность, образованная пересечением поверхности конуса и плоскости, параметрами которой являются координаты ее центра x_0, y_0, z_0, радиус R и параметры ориентации плоскости, в которой лежит окружность. Так как в рассматриваемом случае окружность замкнута, то два последних реквизита в семантической конструкции <ребро КП> пустые и могут быть исключены.

Напомним, что согласно (4.4) направление обвода является логическим условием, определяющим ту часть замкнутой кривой (в данном случае окружности), которая должна быть использована. Понятие <направление обвода> для кривой аналогично понятию <область определения> для поверхности.

Таким образом, конструкция <ребро КП> преобразуется к виду

<ребро КП> ::= <окружность> <x_0, y_0, z_0, R> параметры плоскости>. (5.4)

В этой конструкции <параметры плоскости> – ссылка на описание поверхности.

Задача реквизита <область определения конической поверхности> заключается в определении тех точек поверхности, которые принадлежат рассматриваемой структуре. В данном случае это условие удобно записать в системе координат, связанной с конусом (рис. 10, *б*), в виде

$$x_к \leq H. \tag{5.5}$$

Вторая часть этой конструкции <конус> связана с описанием плоской грани. В описании <плоская грань> реквизит <параметры плоскости> является параметром процедуры, которая определяет (вычисляет) координаты, принадлежащие плоскости. Существует ряд способов описания плоскости. В данном варианте плоскость удобно рассматривать в системе координат конуса, проходящей через точку $x_к = H$, $y = z = 0$ перпендикулярно оси $x_к$. Тогда единственным параметром, определяющим положение в плоскости в системе координат конуса, будет значение H, т. е.

<параметры плоскости> ::= <H>.

Поскольку граничные ребра плоскости аналогичны граничным ребрам конуса, то описание этого реквизита можно заменить ссылкой на

<ребро плоскости> ::= <ребро КП>.

Область определения плоскости может быть по аналогии с (5.4) представлена в виде логического выражения, определяющего условие существования любой точки поверхности круга, ограниченной окружностью радиуса R:

$$r = \sqrt{z^2 + y^2} \le R\,, \tag{5.6}$$

где z и y – координаты произвольной точки плоскости в системе координат, связанной с конусом (рис. 10, *б*). Соответственно реквизит

<область определения плоскости> ::= < $\sqrt{z^2 + y^2} \le R$ >. (5.7)

Таким образом, полностью оформлено (синтезировано) описание геометрической фигуры (конуса), состоящей из двух поверхностей. Собирая воедино все отработанные реквизиты (5.4) – (5.7) общей конструкции <конус>, получаем полное описание

<конус> ::= <коническая поверхность> <$x_к$, $y_к$, $z_к$, $\alpha_к$, $\beta_к$, $\varphi_к$, $\gamma_к$>, <окружность> < x_0, y_0, z_0, R> <$x_к \le H$>, <плоскость> <H> <окружность> < $\sqrt{z^2 + y^2} \le R$ >. (5.8)

В подобном виде геометрическая фигура <конус> является семантически (содержательно) законченной конструкцией и представляет собой геометрическую модель конуса. В зависимости от дальнейшего использования эта конструкция подвергается модификациям и дополнениям, которые связаны с манипуляциями над геометрической моделью (объединение с другими моделями, получение проекций и сечений и т. д.).

Шар является второй геометрической фигурой, представленной на рис. 9, и описывается одной поверхностью. В исходной форме шар не имеет дополнительных граней, не требует формирования условия существования области определения. Если поместить центр шара в начало координат базовой системы, то параметром поверхности будет только радиус шара $R_ш$. Тогда в окончательном виде для рассматриваемого примера семантическую конструкцию, описывающую шар, можно представить в виде

<шар> ::= <шаровая поверхность (ШП)> <параметры ШП>.

Здесь <параметры ШП> ::= $R_ш$.

Параллелепипед является третьей геометрической фигурой рассматриваемой детали. Ребра его представлены отрезками прямых, ограниченных точками начала и конца. Центр осей координат фигуры смещен вдоль оси z относительно базовой системы координат. Оси параллелепипеда $x_п$, $y_п$, $z_п$ параллельны базовой системе (рис. 11).

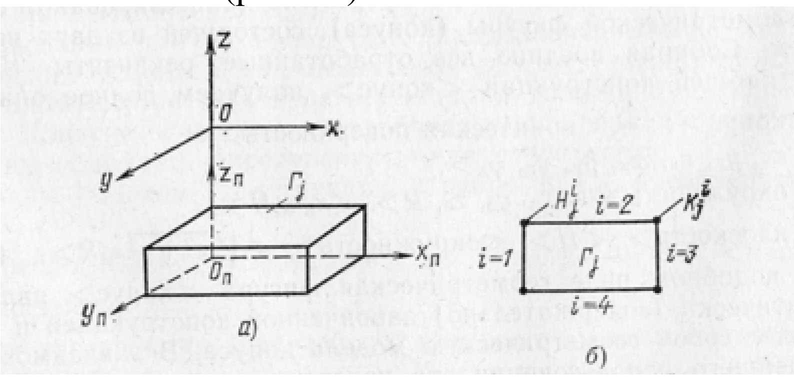


Рис. 11. Параллепипед (*а*) и его грань (*б*)

Фигура имеет шесть граней с индексами $j = 1 \div 6$; каждая грань имеет по четыре ребра P^i_j, $i = 1 \div 4$; каждое ребро – точки начала и конца H^i_j, K^i_j, представленные тройками цифр:

$$H^i_j = (x^i_j, y^i_j, z^i_j)_н; \quad K^i_j = (x^i_j, y^i_j, z^i_j)_к \tag{5.9}$$

В нашей постановке область определения j-й границы находится из условий

$$\min_{i}\{\chi_j^i\} \le \chi_j \le \max_{i}\{\chi_j^i\} \qquad (5.10)$$

где $\chi = x$ или y или z; индексы ij определены выше.

Положение j-й грани определяется направляющими косинусами $\{m^j_x, m^j_y, m^j_z\}$. В соответствии с выбранной системой координат m^j равны ± 1 или 0.

Таким образом, параллелепипед в результате синтетических операций приводится в окончательном виде к следующей лингвистической конструкции:

<параллелепипед> ::= {<грань $Г_j$>};
<грань $Г_j$> ::= <плоскость> <параметры плоскости $Г_j$>;
<область определения $Г_j$> <ребро j-й грани (P^i_j)> (5.11)

Здесь <параметры плоскости $Г_j$> ::= <m^j_x, m^j_y, m^j_z> <область определения> – совокупность выражений (5.10).

Последним элементом в лингвистической структуре (5.11) являются ребра j-й грани, обозначенные P^i_j где i = 1÷4 – индекс ребра грани. Ребра представлены отрезками прямых, не требуют для своего описания указания направления обвода (4.4) и однозначно определяются в пространстве координатами начала и конца каждого ребра. В соответствии с принятой ранее формой описания плоских фигур (4.3) и правилами индексации ребер лингвистическая конструкция ребра определяется следующим образом:

<P^i_j> ::= <прямая> <координаты начала (H^i_j) и конца (K^i_j)>,

где координаты H^i_j, K^i_j представлены парой точек (началом и концом) (5.9).

Далее можно приступить к последнему шагу рассматриваемого процесса синтезирования детали (рис. 9) на основе описаний трех геометрических фигур <конус>, <шар>, <параллелепипед>.

Как видно из рис. 9, конус пересекается с шаром, а шар с параллелепипедом. В результате, первого пересечения коническая поверхность (КП) приобретает новое ребро (рис. 12), которое условно назовем $P_{шк}$ (ребро шар – конус). Описание этого ребра должно дополнить конструкцию (5.8). Помимо этого появляется необходимость в изменении области определения конической поверхности, которая ранее была выражена (5.5)

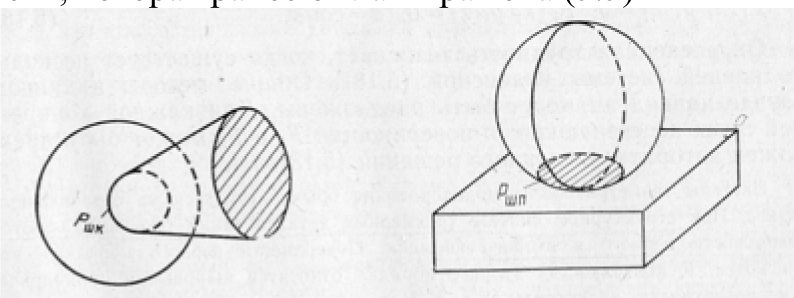


Рис. 12. Пересечение конуса с шаром

Рис. 13. Пересечение шара с параллелепипедом

Подобные преобразования должны коснуться и описания шара. В результате пересечения шара с параллелепипедом образуется ребро $P_{шп}$ (ребро шар – параллелепипед) (рис. 13), и требуется найти области определения поверхности шара и верхней грани параллелепипеда.

Таким образом, на последнем шаге синтеза детали возникают две задачи: добавить к ранее образованным граням новые ребра и сформулировать для всех инцидентных граней области определения образующих поверхностей.

Рассмотрим способ формирования ребер. В общем случае ребро представляет собой пространственную кривую. По определению пространственной кривой ее описание дается в виде уравнений двух пересекающихся поверхностей

$$F_1(x, y, г) = 0, \;\; F_2(x, y, z) = 0. \qquad (5.12)$$

Задавая одну из координат в качестве независимого параметра (пусть это будет координата z), можно разрешить эту систему уравнений относительно двух других координат x и y и получить выражение для их расчета в явной аналитической форме

$$x = f_x(z), \; y = f_x(z) \qquad (5.13)$$

Таким образом можно получить пространственную кривую, образованную, например, пересечением шара и конической поверхности.

В более сложных случаях зависимость типа (5.13) можно найти численными методами в виде табличных данных. Для компактного представления эти табличные зависимости $x = f_x(z)$; $y = f_y(z)$ следует аппроксимировать.

Так решается первая задача – определение вновь образованных ребер. По сути дела она сводится к пошаговому решению системы уравнений (5.12) при заданном z:

$$F_1(x, y, г) = 0, \;\; F_2(x, y, z) = 0, z = \text{const}. \qquad (5.14)$$

Определенная трудность возникает, когда существует несколько корней системы уравнений (5.14). Общие методы в данном случае навряд ли могут быть предложены. Для каждой конкретной пары пересекающихся поверхностей F_1 и F_2 может быть предложен алгоритм численного решения (5.14).

Системы геометрического моделирования обычно строятся на ограниченном базисе. При структурном синтезе трехмерных деталей таким базисом являются поверхности первого и второго порядка. Поверхности первого порядка – это плоскости. К поверхностях второго порядка относятся шаровые и цилиндрические поверхности, эллипсоиды и т. д. Число подобных поверхностей ограничено (порядка десяти), а потому возможные комбинации пар поверхностей также составляют вполне обозримое множество. Для каждой такой пары может быть составлена процедура нахождения полного состава корней (5.14) и соответственно точек кривой пересечения поверхностей при фиксированном значении координаты z.

Вторая задача заключается в нахождении области определения грани. Для частных случаев эта задача рассматривалась выше и сводилась к составлению условий, определяющих координаты точек требуемой области. В случаях (5.6) и (5.10) задача сводилась к заданию диапазона изменения координаты в связанной с элементарной фигурой системе координат. При этом пределы задаются численно. Надо полагать, что подобный способ заданий наиболее удобен. Трудность возникает в разработке алгоритмических процедур, формирующих систему неравенств для общего случая, когда ребра заданы параметрически в форме (5.13).

На рис. 14 представлен эллипсоид, который является образующей поверхностью для грани (на рис. заштрихована). Грань *Г* имеет четыре ребра, каждое из которых задано в соответствии с (5.13) парой $x_i = f^i_x(z)$ и, $y_i = f^i_x(z)$, $i = 1 \div 4$. Ребра пересекаются в вершинах с координатами x_j, y_j, z_j, $j = 1 \div 4$. Точка *A* принадлежит эллипсу, и значения ее координат *x*, *y*, *z* должны удовлетворять условию нахождения точки внутри грани.

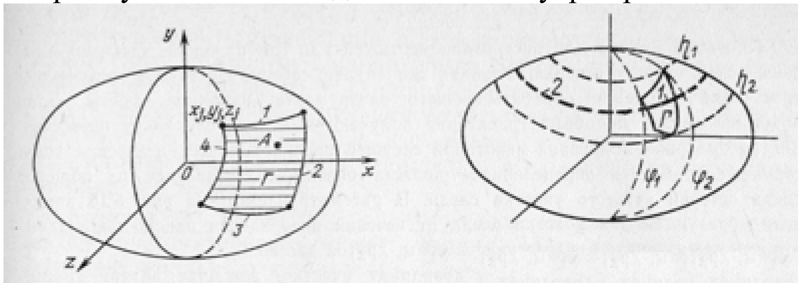


Рис. 14. К определению грани на эллипсоиде

Рис. 15. К определению грани и следа картографическим способом: *1*– участок следа внутри грани; *2* –участок следа вне грани

Визуально это устанавливается однозначно, поэтому при традиционных методах проектирования задача выяснения принадлежности точек той или иной части поверхности не возникает. Вычислительными методами геометрического моделирования формально определяется такое понятие, как «нахождение точки вне или внутри области» в виде соответствующего логического выражения или отношений типа неравенств. Частные типы этих отношений для некоторых примеров были приведены выше.

Рассмотрим более общий метод. Каждый тип поверхности имеет свою систему измерения положения точек на поверхности. В частности, для эллипсоида, рассмотренного на рис. 14, аналогом такой системы измерения может служить картографическая система параллелей и меридианов. Указанием диапазона широт и долгот может быть определена зона существования интересующей нас грани (рис. 15) с точностью, достаточной для решения последующих задач получения проекций и различного типа сечений грани.

Проекции нужны для построения чертежей или отображений, частично для этих целей служат сечения. Главная же задача сечений состоит в получении траектории движения обрабатывающего инструмента, например, фрезы. Для объемной детали подобные траектории получаются в виде следов от пересечения рассматриваемой грани некоторой секущей плоскостью. Семантическая конструкция <область определения> должна обеспечить выделение из общего следа сечений нужного участка следа. В рассматриваемом на рис. 15 варианте образуются два участка следа от сечений поверхности плоскостью. Один участок лежит внутри интересующей зоны, другой вне ее.

В картографической системе координат участки, лежащие внутри грани, могут задаваться неравенствами $\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2$, $\eta_1 \le \eta \le \eta_2$.

5.2. *Другие характерные процедуры геометрического моделирования*

Для геометрического моделирования трехмерных объектов характерны те же типы процедур геометрического моделирования, что и для плоских объектов. В их состав помимо рассмотренных выше процедур синтеза геометрической структуры входят процедуры манипуляции, компоновки, размещения геометрического анализа и формирования заготовок для других подсистем. При выполнении указанных процедур для трехмерных объектов требуется солидный набор алгоритмических методов, опирающихся на аналитическую и дифференциальную геометрию и вычислительную математику. Отметим ряд характерных особенностей рассмотренных процедур и области их использования.

Процедуры манипуляции по содержанию повторяют плоский вариант, реализация процедур связана главным образом с вычислительными трудностями и соответственно с временем счета. Процедуры реализуют повороты и перемещение объекта в трехмерном пространстве и изменение масштаба. Процедуры являются составной частью общего процесса синтеза структуры сложного объекта на основе использования примитивов или других элементов базиса геометрического моделирования.

Элемент базиса геометрического моделирования, как правило, удобно в смысле компактности и наглядности отображать в системе координат, связанной с его осями. Элементы базиса используются для построения более сложного объекта, который имеет собственную систему координат. Относительно этой системы координат элементы смещаются и поворачиваются различным способом. Одна из процедур манипуляции состоит в приведении уравнений всех поверхностей к единой системе координат, т. е. в учете смещения объекта манипуляции относительно исходной системы координат x, y, z на x_0, y_0, z_0 и ее поворота на углы α, β, γ. Преобразования эти достаточно громоздки, и их можно найти в справочниках по математике.

Компоновка трехмерных объектов едва ли не одна из главных задач конструкторского проектирования. Здесь следует учитывать ряд критериальных показателей. В их число входят и такие показатели, которые формально не определяются: критерии производственной эстетики, удобство эксплуатации, простота доступа для ремонта и профилактических осмотров и т. п.

Задача размещения помимо этого учитывает большое число функциональных показателей объектов проектирования, таких как тепловые, электрические и т. д.

При проектировании летательных аппаратов или кораблей компоновка должна строиться с учетом размещения центра тяжести, положение которого непосредственно связано с устойчивостью объекта. Компоновка трехмерных объектов связана в большинстве случаев с установкой широкой номенклатуры разногабаритных элементов в ограниченном объеме. Исходя из этого задача компоновки трехмерных объектов в САПР решается, как правило, в диалоговом режиме. При этом возможны различные сценарии подобного диалога. Например, первоначальное размещение оборудования в здании может определяться формальной процедурой. Более тонко размещение проводится человеком с учетом эксплуатационных и эстетических критериев с последующей его проверкой на ЭВМ по ряду формальных критериев.

В качестве специфической для трехмерного варианта следует рассмотреть *задачу раскроя*. Для двумерного варианта это типичная задача размещения шаблонов на листе материала, обеспечивающего минимум отходов. Для трехмерного варианта подобная задача, естественно, не ставится и термин «раскрой» используется в другом смысле, не имеющем прямого отношения к задачам размещения. Это понятие связано с формированием на плоском листе материала конфигураций отдельных фрагментов обшивки корпуса различных устройств (например, летательного аппарата или судна).

Задача эта аналогична задаче «выкройки», которую решает закройщик на основе

шаблонов, настраиваемых по параметрам заказчика. Следует отметить, что задача закройщика в определенном смысле сложнее, поскольку поверхности, подлежащие развертке на плоскости, не имеют аналитического описания и принадлежат к типу так называемых скульптурных поверхностей, и решается эвристически на основе опыта закройщика. Можно экспериментально подобрать алгоритм, связывающий входные размеры (параметры заказчика) с геометрическими параметрами шаблонов, и создать на этой основе программное обеспечение для управления нарезкой материала.

В случае, когда рассматриваются формально определенные поверхности, задача может быть сведена к следующей последовательности операций. Полагается, что геометрическая структура объекта синтезирована и описана в виде совокупности граней (5.1), каждая из которых представлена в форме (5.2). Задача далее решается на декомпозиционных принципах: грани, представляющие собой поверхности, ограниченные ребрами, рассматриваются независимо.

Для каждого класса поверхностей должна быть сформирована процедура развертки поверхности на плоскости. Развертка на плоскости предполагает ее фрагментацию на плоские элементы (рис. 16). Развернутая поверхность покрывается разверткой граней. Последняя операция представляет собой отображение ребер грани на развернутой поверхности. В результате этих операций создаются плоские фрагменты (рис. 16, *б*).

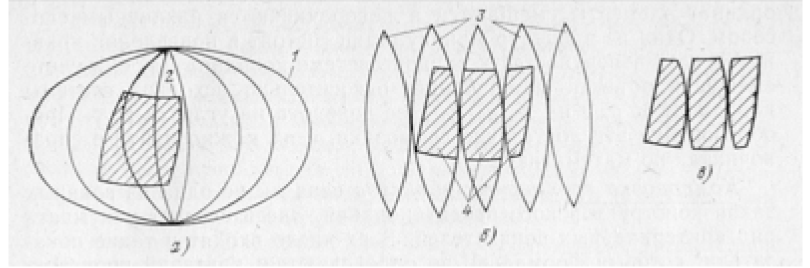


Рис. 16. К формированию фрагментов грани:
а – исходные поверхность *1* и грань *2*; *б* – развернутые поверхность *3* и грань *4*;
в – фрагменты развернутой грани

Формирование фрагментов является синтетической процедурой. Ее можно представить в виде либо некоторой расчетной операции (рис. 17, *а*), либо поисковой итерационной процедуры (рис. 17, *б*).

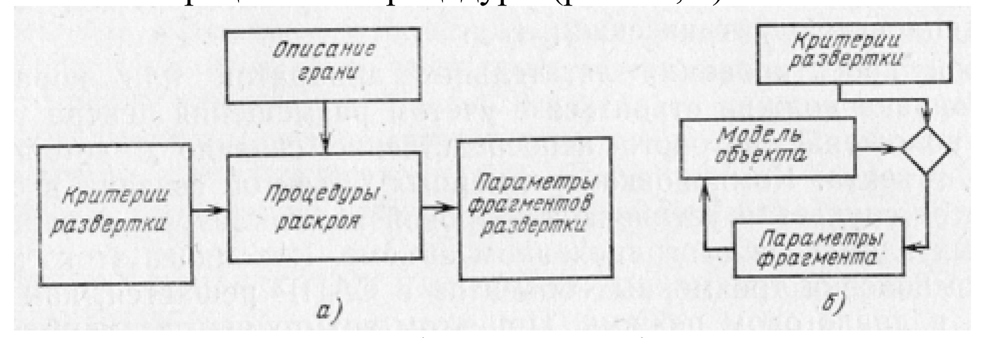


Рис. 17. Варианты схем формирования фрагментов раскроя

В первом случае по заданным критериям и описанию грани процедура позволяет получить решение в виде параметров фрагментов развертки; во втором – параметры фрагментов подбираются, а математическая модель отображает связь между параметрами фрагментов развертки и критериальными показателями. Такими критериальными показателями будут число фрагментов и точность воспроизведения поверхности при ее сшивке из фрагментов.

После решения задачи получения плоских фрагментов грани может быть поставлена задача оптимального размещения фрагментов на плоскости листового материала (т. е. уже рассмотренная в п. 4.3 задача раскроя материала в плоской интерпретации).

Рассмотрим *процедуры анализа* в системе геометрического моделирования. Главное содержание процедур анализа состоит в проверке решений, принимаемых разработчиком. При синтезе деталей на основе примитивов трехмерного геометрического моделирования возможны различные ситуации, при которых необходимо проверять правильность принимаемых решений. Характерным примером является контроль на пересекаемость поверхностей. Здесь может возникать ряд задач, связанных с анализом непрерывности поверхности детали, т. е. с наличием пересечений поверхностей, выходом крайних точек детали за допустимые границы. Если информация избыточна, то она обязательно контролируется на взаимную совместимость. Здесь задача близка по постановке к задаче на плоскости.

При размещении и компоновке основная функция программ анализа связана с проверкой непересекаемости и невыхода элементов группы за габариты.

Существует ряд задач анализа принимаемых конструкторских решений на соответствие функциональным критериям. Такие задачи могут требовать создания функциональных моделей, хотя в принципе это не обязательно. Так, в задачах компоновки зачастую ставятся вопросы совместимости элементов различного назначения. Чтобы решать эти задачи, достаточно иметь списки несовместимости групп элементов и при размещении запрещать подобное соседство.

Непосредственно к анализу относятся также метрические процедуры расчета расстояний между любыми поименованными точками пространственной модели, точкой и поверхностью и т. д. К ним же примыкают расчеты площадей, объемов, весов и моментов инерции синтезируемых деталей.

В завершение раздела геометрического моделирования следует остановиться на процедурах *формирования заготовок* для других подсистем конструкторского проектирования.

По сути, конечной задачей системы геометрического моделирования является формирование пространственных образов деталей и сборок в виде, удобном для дальнейшего использования в подсистемах отображения объекта, формирования графической документации и технологической подготовки производства. Форма описания структуры в виде набора граней представляется в этом смысле наиболее удобной и соответствующей этому конечному назначению.

Семантическая конструкция <грань> (5.2) имеет два основных реквизита: поверхность (с областью ее определения) и набор ребер. Каждое ребро, в свою очередь, отражается пространственной кривой, задаваемой в параметрической форме (5.13), и граничными точками для каждого ребра. Если выражения типа $x = f_x(z)$, $y = f_y(z)$ дополняются диапазоном значений z, в котором существует кривая, то условия для построения любой проекции ребра

достаточны.

Для подсистем отображения и формирования графической документации получение проекций ребер на различные плоскости является общей задачей и составляет основу представления грани на экранах и чертежах. Это отображение должно дополняться проекцией контура поверхности на плоскость. Задача получения проекции контура поверхности сводится к нахождению сечения или нескольких сечений, параллельных плоскости проекции.

Таким образом, формирование заготовок для подсистем графического отображения и формирования графической документации (см. рис. 1) включает получение проекций ребер на плоскости и сечений поверхностей плоскостями. К формированию заготовок следует отнести также процедуры получения разверток граней, образованных на пространственных поверхностях, рассмотренных выше. Эти процедуры одновременно готовят как безразмерный чертеж (выкройку), необходимый для отображения, так и управляющую программу для технологического автомата раскроя материала.

Конечной задачей конструкторского проектирования является формирование документации, которая служит средством интерфейса между проектным бюро и подсистемой технологической подготовки производства. При наличии геометрической модели объекта проектирования появляется возможность перехода к безбумажной форме интерфейса. В задачи интерфейса входит построение пространственных кривых, необходимых для формирования траектории движения инструмента.

Возможны два варианта построения траектории инструмента: в виде непрерывной линии типа винтовой, охватывающей с определенным шагом поверхность обработки, и в виде следа от среза поверхности секущими плоскостями. Во втором случае образуются террасообразные замкнутые траектории. Переход с одной траектории на другую осуществляется скачками. В обоих случаях образование траектории должно проводиться с учетом геометрических параметров режущей кромки инструмента. Задачи подобного типа решаются процедурами геометрического моделирования с учетом параметров инструмента и режимов резания.

6. Системы графического отображения конструкторского проектирования

6.1. *Функции системы графического отображения*

Основная функция системы графического отображения (СГО) состоит в визуальном наблюдении принимаемых конструкторских решений на терминальных устройствах. Подобными устройствами в первую очередь являются графические дисплеи и графопостроители. Функции СГО реализуются путем перевода геометрического образа объекта в графической с последующей перекодировкой этого образа в систему команд исполнения. В число процедур, обеспечивающих визуализацию, входят выделение отдельных фрагментов графики и их акцентрирование, укрупнение масштаба, ликвидация ненужных для наблюдения линий и т. д.

Общая схема преобразования исходной геометрической модели в гра-

фический образ, ориентированный на конкретное техническое устройство отображения, дана на рис. 18.

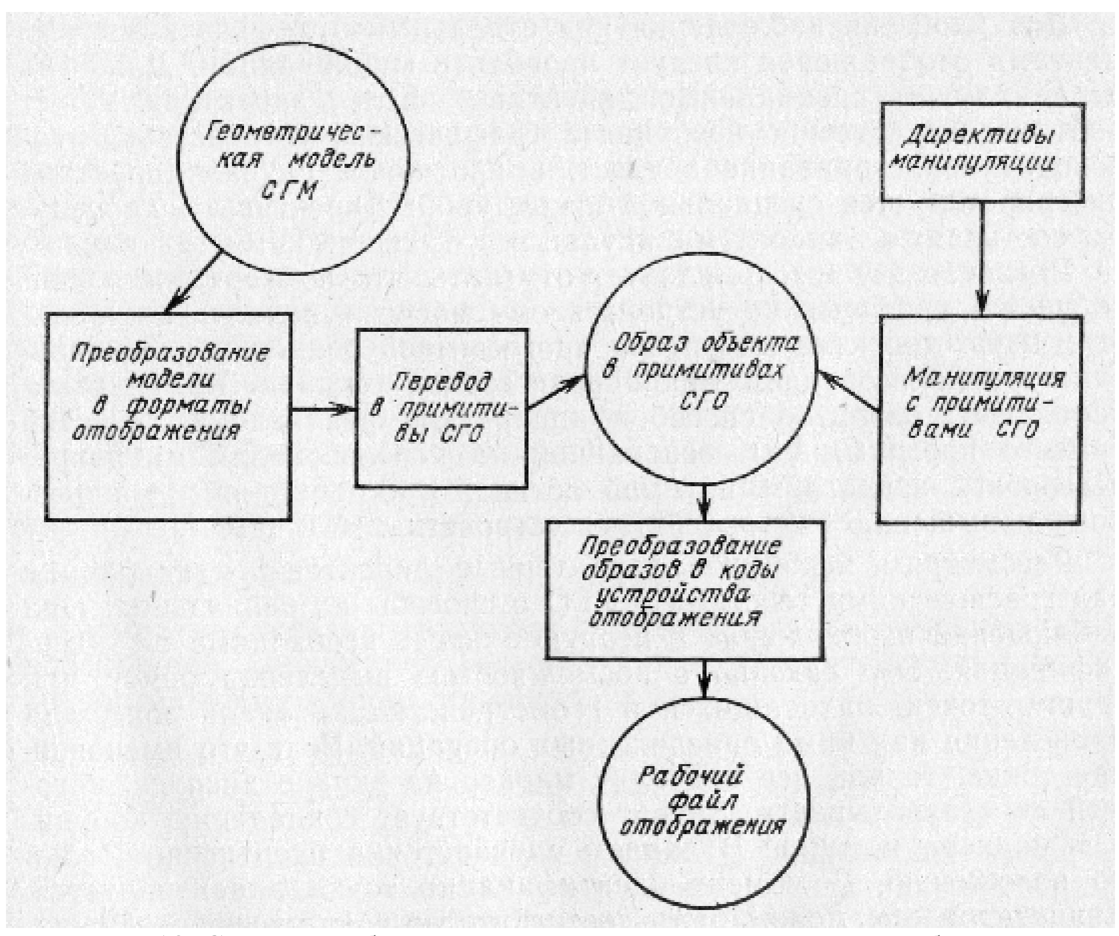


Рис. 5.18. Схема преобразования геометрической модели в изображение

Исходная геометрическая модель синтезирована в СГМ и представлена в виде совокупности граней. Далее осуществляется ряд подготовительных работ. Объект может быть предварительно обработан с помощью процедур формирования сечений и проек ций, обеспечивающих преобразование геометрического образа в форматы отображения. Специально для отображения могут формироваться аксонометрические проекции объекта и проекции типа общего вида при наблюдении с различных точек.

Полученные тем или иным способом образы, предназначенные для отображения, транслируются в базу данных СГО, т. е. графический образ выражается в примитивах СГО с соблюдением синтаксических правил представления данных. По схеме рис. 5.18 эта операция соответствует процедуре перевода образа в примитивы СГО. После выполнения рассмотренной операции появляется новый (графический) образ объекта. Таких образов может быть много, в зависимости от числа видов отображений. Между базовой геометрической моделью и ее производными графическими образами устанавливаются структурные соответствия.

Описание объекта в базе данных СГО должно быть стандартным, инвариантным к техническим средствам. Для воспроизведения графического образа тем или иным техническим средством отображения служат блоки преобразования данных СГО в рабочий файл (массив) отображения. Эти блоки

образуют программный интерфейс между базой данных и средствами отображения, т. е. переводят стандартное описание графического образа (текст СГО) в форму, необходимую для восприятия конкретным техническим средством. Такие блоки называют постпроцессорами.

Для удобства наблюдения над отдельными графическими элементами отображения следует проводить манипуляции. Для этих целей служат специальные директивы. Если директива может быть непосредственно воспринята графическим устройством, происходит ее встраивание в текст, в противном случае директива интерпретируется специальной процедурой. Директивы и процедуры составляют аппарат манипуляции с графическими текстами.

Развивая эту мысль, следует отметить, что по мере роста «интеллекта» графических устройств они могут выполнять все большее число директив, не требуя программной поддержки. Это связано с использованием микропроцессорной техники. Как показывает опыт, развитие способов аппаратной реализации директив (вместо программной), основанной на использовании микропроцессоров с непрограммируемой логикой работы, приводит к резкому повышению быстродействия устройства.

Рассмотрим некоторые характерные директивы манипуляции над графическими текстами в СГО и способы их реализации. При наблюдении изображения в первую очередь необходима его идентификация. Это связано с возможностью выделения одной или группы точек, находящихся в геометрически заданной зоне, для проведения над ними определенных операций. Если это именованная точка, то под нее подводят маркер на экране дисплея, который ее «захватывает». Захват соответствует совпадению координат маркера и точки. В данном случае точка идентифицирована по положению. В момент идентификации точка акцентируется. Акцентирование может быть достигнуто за счет цветовой контрастности, прерывания (мигания) картинки или какого-либо другого признака, подчеркивающего нужный элемент.

Рассмотренная процедура идентификации может быть проведена над любым именованным объектом, представляющим собой совокупность примитивов СГО или базовых элементов, определенных в языке СГО. Для идентификации достаточно маркер подвести под некоторую условную базовую точку названного объекта. Возможно, что таких точек будет несколько.

Идентифицированная точка (объект) далее является предметом обработки: ее можно удалить или заменить. Параметры объекта можно модифицировать. Модификации, связанные с изменением структуры и параметров объекта проектирования, требуют своего отображения в геометрическом образе объекта, т. е. изменения описания исходной геометрической модели (см. рис. 18). Вопрос взаимодействия систем графического отображения с системой геометрического моделирования является специальным и обсуждается ниже.

Существенно более сложным процессом идентификации или выделения нужной части графического образа является так называемый режим «окна». Обычно окно выбирается прямоугольным. Процедура выделения окна формирует на плоском образе объекта новый образ. На рис. 19 изображен

случай, когда объект набран из графических примитивов, т. е. представляет собой набор (гирлянду) плоских кривых различного вида. Идентификация и преобразование объекта происходят за счет изменения текстов, выраженных в примитивах СГО (см. рис. 18).

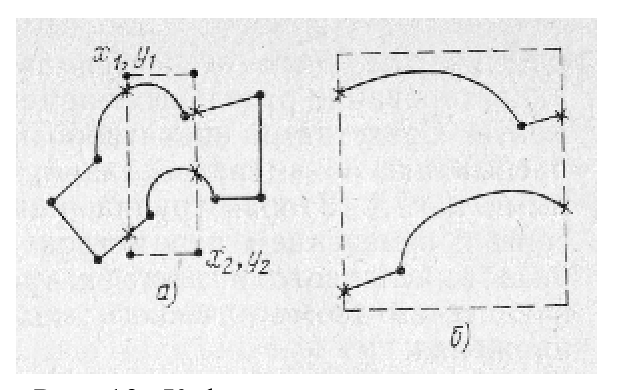


Рис. 19. К формированию «окна» на графическом изображении:
а – исходное изображение; *б* –выделенная часть изображения

В рассматриваемом случае задача сводится к частичной замене текста СГО. Если границы «окна» (рис. 19) определяются двумя парами точек, то в выделяемом тексте остаются все точки текста с координатами, отвечающими условиям

$$x_1 \le x \le x_2, \quad y_1 \le y \le y_2$$

и, кроме того, создаются новые граничные точки, образованные пересечением кривых исходного текста СГО с вертикальными и горизонтальными границами «окна»:

x_1 = const, y_1 = const;
x_2 = const, y_2 = const.

Выделенный таким образом фрагмент графического образа объекта далее может быть модифицирован. Как и ранее, следует рассматривать две группы модификаций. Первая группа выполняется процедурами, обеспечивающими удобство наблюдения. К ним прежде всего относятся изменение масштаба изображения, акцентирование отдельных элементов или всего выделенного фрагмента. Средствами акцентирования являются градации засветки, прерывание и изменение линий, замена сплошных линий штриховыми и т. д. Вторая группа — синтетические процедуры, они связаны с изменением параметров и структуры геометрического образа выделенного объекта и требуют организации взаимодействия систем геометрического моделирования и графического отображения.

7. Системы формирования документации конструкторского проектирования

7.1. *Функции системы документирования*

В общем процессе проектирования документирование является завершающей фазой, фиксирующей (отображающей) результаты проектирования в форме документации, главное назначение которой заключается в обеспечении производства информацией, необходимой и достаточной для изготовления проектируемого объекта. Другой задачей документации является обеспечение эксплуатации уже изготовленного объекта.

Основной состав документации формируется и изготавливается на этапе конструкторского проектирования. Конструкторская документация обычно является исходной для этапа технологической подготовки производства,

на котором разрабатывается технологический процесс производства объекта. В конструкторскую документацию входят графическая и текстовая (табличная) документация.

При автоматизированном производстве, включающем станки и автоматы с ЧПУ, на этапе конструкторского проектирования графическая и текстовая документация могут заменяться (либо дополняться) технологическими управляющими программами для автоматизированного оборудования, т. е. имеет место совмещение этапов конструкторского и технологического проектирования.

По мере расширения и развития автоматизированного производства намечается тенденция к переходу к так называемой безбумажной технологии производства, при которой из цепи «проектирование–производство» исключается информация на бумажных носителях.

Задачу выпуска конструкторской документации целесообразно рассматривать в полном объеме с учетом как графической, так и текстовой документации. В этом случае система документирования приобретает самостоятельное содержание и имеет помимо СГМ другие источники информации. СГМ поставляет только ту часть информации, которая служит для формирования графической документации. Графической частью далеко не исчерпывается содержание конструкторских документов. Каждый чертеж помимо чисто графической части содержит размерные параметры, информацию по точности и способу обработки, сведения о материале и ряд другой сопровождающей информации.

Все эти данные отображаются на чертеже либо в виде мнемонических знаков, либо в виде текста. Помимо этого текстом передается всевозможная служебная информация. Лист чертежа имеет соответствующее обрамление, паспорт и т. д.

Кроме чертежей, основу которых составляет графика, имеется большое многообразие специальной текстовой документации. Для РЭА основу такой текстовой документации составляют таблицы связей и монтажа, спецификации, отображающие характеристики комплектующих элементов. Большая часть этой информации, необходимой для формирования текстовой и графической документации, должна храниться в специальных базах данных САПР. Любой элемент проектируемого объекта может обрести реквизиты, необходимые для формирования документации, на основе информации этих баз данных системы документирования. Источником формирования документации может служить также оригинальная не библиотечная информация, вводимая дополнительно проектировщиком.

Таким образом, формирование документации по спроектированному объекту осуществляется на основе трех основных источников: СГМ, базы данных системы документирования и лингвистических средств пользователя, дополняющих недостающей информацией исходные данные для выпуска документации (рис. 20).

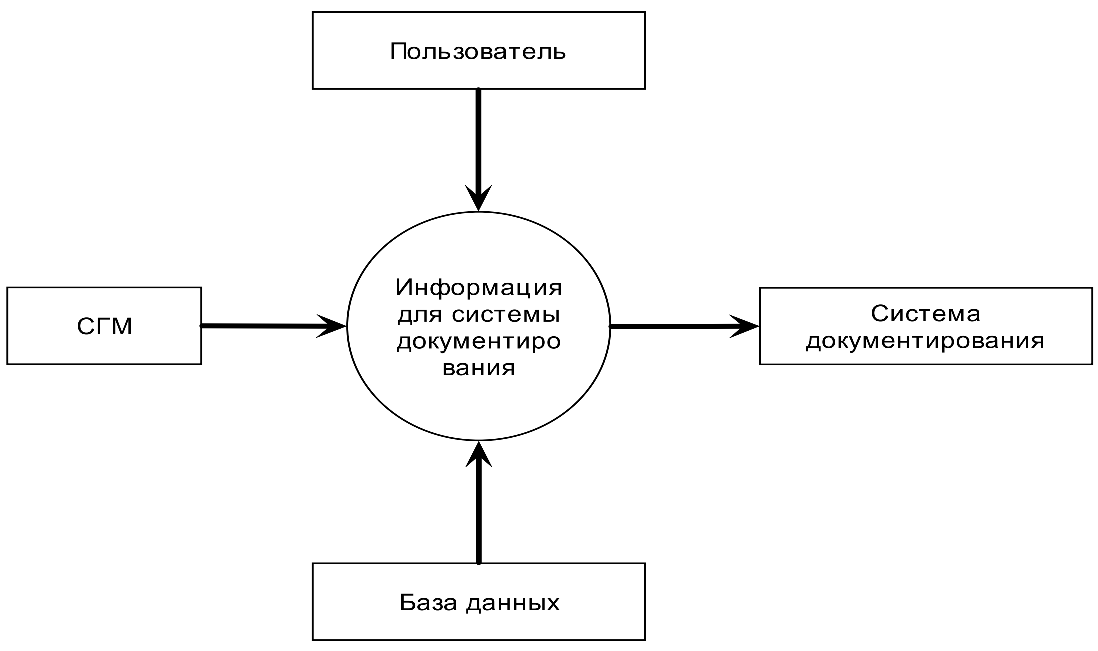


Рис. 20. Схема информационного взаимодействия в системе документирования

Получением информации не исчерпывается процесс формирования документации. Информацию необходимо далее разместить и изобразить в соответствии с правилами оформления документа, нормативами по исполнению графических и текстовых элементов. Информация, снабженная признаками начертания и размещения, хранится в стандартной архивной форме в базе данных системы документирования.

Весь процесс сбора информации, размещения и формирования признаков начертания составляет содержательную часть процедур системы документирования. Результатом работы этой части системы являются сформированные документы, которые хранятся в ее архиве.

Документация в архивах хранится в форме стандартного описания на языке внутреннего представления графической и текстовой информации (ЯГТИ). Этот язык является одним из компонентов лингвистического обеспечения САПР. Стандартизация языка позволяет передавать документацию на машинных носителях в любые производственные организации, имеющие в своем распоряжении вычислительные средства, необходимые при изготовлении документации для конкретного производства. Блоки, транслирующие стандартные тексты ЯГТИ в коды их исполнения на конкретных устройствах (постпроцессоры), имеют в качестве входных данных описание документа в кодах ЯГТИ, а выходных— управляющую информацию для конкретного исполнительного устройства (рис. 21).

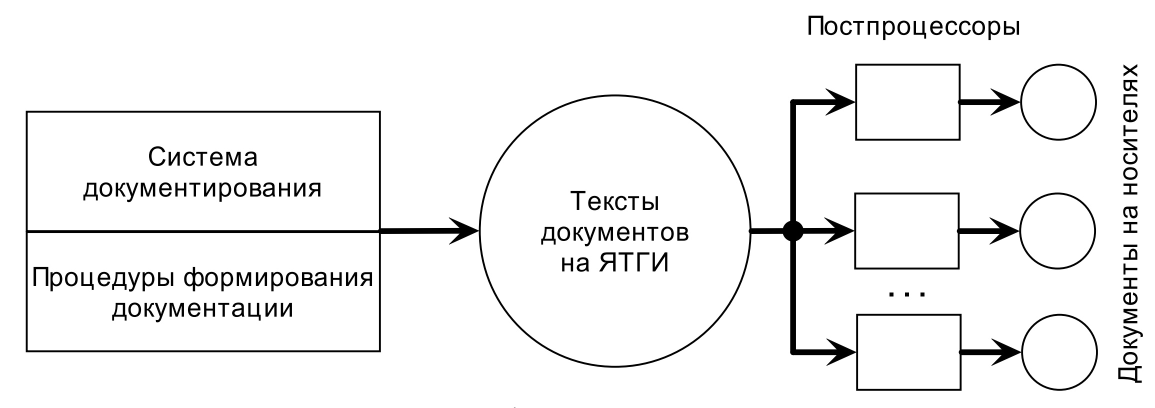


Рис. 21. Схема формирования документов

7.2. *Автоматизация формирования документации*

Для автоматизации процесса документирования служат специализированный язык и соответствующий интерпретатор этого языка. Это — язык задания конструкторской документации (ЯЗКД), описывающий: форматы, на которых исполняется документ, имена фрагментов текста, последовательность процедур преобразования текста, координаты или процедуры размещения текста, способы изображения текста. Здесь под текстом следует понимать как алфавитно-цифровую, так и графическую информацию, оформленную по соответствующим синтаксических правилам.

Формат документа – это описание обрамления листов, паспорта и других стандартных позиций, характерных для документа. В задании на ЯЗКД дается ссылка на этот формат, полное описание которого хранится в библиотеке базы данных. Далее описываются процедуры формирования текста документа и его размещения. Предполагается, что все основные заготовки документов выполнены на этапах конструкторского проектирования, а главной задачей этапа документирования является их оформление. Подобными заготовками служат сечения и проекции, получаемые в СГМ. Информация в такой форме является исходной графической заготовкой (типа «слепыш»), которую можно с помощью соответствующих операций превратить в чертеж. Превращение графического изображения в чертеж можно представить в виде диалогового процесса, при котором осуществляется решение двух основных задач.

Первая связана с оцифровкой заготовки, т. е. с начертанием размерных линий и простановкой размеров; вторая – с нанесением на чертеж символьной и текстовой информации в основном о технологических нормах обработки. В этом случае в исходный графический текст чертежа вносится символьный и алфавитно-цифровой текст.

Для решения первой задачи на экран графического дисплея через СГО вызывается необходимая проекция или разрез объекта проектирования – графическая основа будущего чертежа. Указываются и идентифицируются точки (обычно это пары точек), между которыми проставляются размеры. Этой информации достаточно для формирования выносных и размерных линий, расчета и простановки размера. Если при этом следует соблюсти некоторые неформальные требования, связанные с эстетикой чертежа, то инфор-

мацию следует дополнить, например, указанием места простановки размера и типа шрифта.

Последовательным выполнением этих операций в интерактивном режиме решается первая основная задача. Здесь имеет место типичный взаимодополняющий интерактивный режим проектирования. Проектировщик намечает точки, между которыми следует определить размеры, и при необходимости место простановки размера. Программные процедуры осуществляют одну из трудоемких работ, связанных с вычислением размеров и формированием размерных линий. Во второй задаче содержательную часть информации формирует человек, который указывает и место ее размещения на графике.

Таков вкратце процесс формирования графического документа, который основан на использовании совокупности управляющих директив, выполняемых в диалоговом режиме. Принципиально документ может создаваться в пакетном режиме. Так в ряде случаев и делается, особенно при формировании текстовой документации. Для этих целей формируется задание на выпуск документа в пакетном режиме, в котором указывается формат документа, текст и способ его размещения. Текст может задаваться самым различным образом. Простейшим способом является его непосредственное описание. Но такая форма задания имеет смысл только для постоянной части документа, задаваемой однажды. Обычно текстовой документ создается в результате обработки данных этапа конструкторского проектирования с использованием реквизитов базы данных.

7.3. *Представление графической и текстовой документации в машинных архивах*

В САПР язык представления графической и текстовой информации, необходимый для отображения результатов проектирования, должен быть аппаратно независим, т. е. форма представления информации в исходном виде должна быть независима от устройства, на которое она выводится.

Язык должен содержать средства описания графики, оформленной с учетом всех действующих правил изготовления чертежей, технологических документов типа фотошаблонов или плазов, оформленных с учетом конкретных требований производства, текстовых документов, оформленных с учетом способов начертания символов и размещения текстов. Информация, как графическая, так и текстовая, должна быть по возможности представлена предельно компактно. Последнее предполагает, что многократно повторяющиеся символы задаются числом повторений, однажды описанные тексты повторно записываются ссылкой на имена их текстов, общие для группы информации данные выносятся за скобки этих групп и в тексте не повторяются. Указания по форме исполнения, предшествующие тексту, сохраняют свою силу до их отмены.

Для компактности возможно также использование принципа работы по умолчанию. Согласно этому принципу наиболее часто употребляемые формы исполнения графической или символьной информации в тексте языка опускаются и при выполнении текста восстанавливаются трансляторами. Отмена

указания «по умолчанию» осуществляется путем записи соответствующего изменения параметра в тексте ЯГТИ.

Язык должен содержать как средства описания содержания информации и ее формы, так и средства управления размещением этой информации на листах документа. Семантической конструкцией верхнего уровня такого языка является

<лист> = <паспорт листа> {<раздел (текста) >}.

К листу могут быть отнесены единицы любого документа: лист текста, лист чертежа или схемы, фотошаблон слоя платы.

Совокупность таких листов составляет законченный документ. Основную содержательную часть графического и символьного текста представляет «абзац». Совокупность «абзацев» составляет раздел:

<раздел> = {<абзац>}.

Абзац объединяет однородную группу элементов отображаемого текста. Семантическая конструкция <абзац> имеет два основных реквизита <паспорт (абзаца)> и <список элементов (входящих в абзац)>. В паспорте собраны все данные по способу начертания элементов (графических или символьных) текста, принадлежащего к данному абзацу.

Абзацы можно разделить на ряд групп по содержанию входящих в них элементов. Каждая из таких групп имеет свой характерный паспорт. К первой группе относятся абзацы, содержащие чисто графическую информацию (абзацы линий). Содержание таких абзацев составляет упорядоченный набор точек с указанием способов интерполяции и ряда характеристик исполнения графики. К этим характеристикам относятся толщины и формы линий (сплошная штриховая и т. д.), цвет их исполнения, признаки размерной линии с указанием места размещения стрелки.

Другой разновидностью графической информации служат контуры, подлежащие соответствующему заполнению: заливке, штриховке и т. д. Абзацы таких подгрупп целесообразно также снабжать самостоятельными паспортами, главная отличительная задача которых описать способы заполнения контуров.

В самостоятельную подгруппу графической информации со своей формой паспорта удобно вынести абзацы дуг. Описание дуг дается тройкой пар координат, две из которых определяют начало и конец дуги, а третья – координату центра дуги. Направление обвода и другие характеристики исполнения выносятся в паспорт.

Ко второй группе абзацев относятся тексты, представляющие упорядоченные наборы символов (цифры, знаки, буквы русского и латинского алфавитов). Содержимое таких абзацев представляет набор строк, первый символ которых имеет привязку к листу документа. Паспорт абзаца отражает способ и форму начертания символов, их ориентацию и порядок размещения.

Символьные тексты архива по спроектированному объекту могут выводиться как на графические, так и на алфавитно-цифровые печатающие устройства, а также на другую печатающую технику. В зависимости от этого вводятся абзацы различной формы, паспорта которых и способы представле-

ния информации по позиционной привязке текста могут быть различными.

Рассмотренные группы графических и символьных текстов составляют основу любой конструкторской документации. Эта же информация может быть использована и для формирования технологической документации, выполняемой в форме управляющих программ изготовления плазов или фотошаблонов.

Есть еще абзацы со специальной информацией, основу которой составляют координаты размещения сложных типовых элементов.

Под размещением здесь понимается указание линейных координат положения базовой точки сложного элемента и его ориентация, т. е. угол поворота относительно собственных осей. Этим элементам могут соответствовать различные типы диафрагм, с помощью которых наносится рисунок на фотошаблон, типы отверстий, подлежащих рассверливанию, типы микросхем, устанавливаемых на несущую конструкцию, элементы сборочного чертежа и т. д.

Паспорт, описывающий общие признаки группы информации, содержащейся в абзаце, имеет позиции, связанные с принадлежностью этой группы к различным типовым элементам (отверстиям, диафрагмам и т. д.). В паспорт удобно, с точки зрения компактности, выносить также более тонкие (детальные) классификационные признаки, например тип отверстия. Если отверстий одного типа много, то, естественно, вынесение его имени за скобки (в паспорт) выгодно. То же относится и к ориентации элемента. Паспортными являются также параметры, определяющие способ начертания, такие как масштабный коэффициент графического исполнения, толщина и цвет линий изготовления чертежа элемента.

Информация абзаца с описанием сложных элементов может использоваться для нескольких целей. Так, лист документации в машинном архиве с набором информации по отверстиям печатной платы может быть использован для трех постпроцессоров:

- подготовки управляющих программ для фотокоординатографа или фотонаборной установки;
- подготовки управляющей программы для сверлильного автомата;
- изготовления чертежа наружного слоя платы на графопостроителе.

В первом случае имена элементов исходного текста на ЯГТИ интерпретируются с использованием баз данных типом диафрагмы для отображения отверстия на фотошаблоне; во втором случае по имени элементов производится выбор диаметра сверла автомата сверления; в третьем случае элементу описания ставится в соответствие его графическое отображение на чертеже.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА

8. Основные задачи автоматизированного проектирования при технологической подготовке производства

Конечной и основной задачей любого проектирования является обеспечение производства необходимой документацией для проведения всей совокупности работ, связанных с созданием объекта и его контролем. Производство имеет сложную структуру с большим разнообразием средств изготовления и контроля, связанных между собой.

Конструкторская документация после выполнения этапа конструирования содержит подробное и точное описание объекта проектирования, достаточное для его однозначного понимания. Однако конструктор, имея дело с объектом проектирования, не может планировать выполнение работ по его созданию. Этой частью работ занимается специальная технологическая служба, которая готовит технологическую документацию. Технологическая документация по объекту производства должна быть доведена до каждого рабочего места и исполнителя, учитывать все промежуточные фазы производства изделия и специфику оборудования. Каждое рабочее место и каждая операция должны быть обеспечены необходимым набором инструмента и специальных приспособлений для выполнения работ. В случае, когда производство имеет оборудование с ЧПУ, в состав документации, поставляемой на рабочее место, должны входить управляющие программы для автоматического выполнения операций.

С автоматизацией проектирования при технологической подготовке производства объекта связаны три основные задачи:

- проектирование технологических процессов;
- проектирование технологической оснастки;
- проектирование управляющих технологических программ для оборудования с ЧПУ.

Технологический процесс (ТП) представляет собой ранжированную последовательность операций, необходимую для проведения подготовительных работ, всех видов обработки, сборки и контроля изделий. Исходными данными для формирования ТП являются описания объекта производства, оборудования пред приятия, приспособлений и инструмента, а также заготовок (рис. 22).

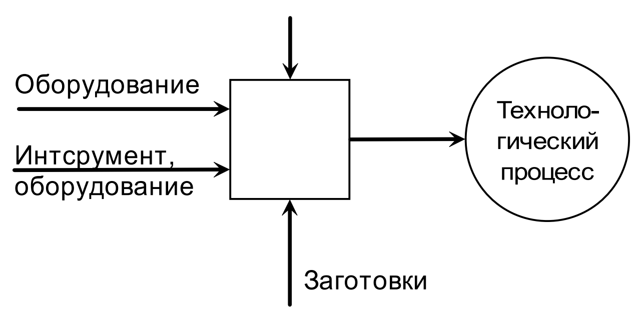


Рис. 22. Схема формирования технологического процесса

Технологический процесс описывается совокупностью документов

различного уровня. Нижним уровнем является операционная технологическая карта (технологические карты), в которой описаны конкретные операции, выполняемые над. деталью, и ее параметры. Более высоким уровнем технологической документации является маршрутный технологический процесс, связанный с планированием операционного маршрута движения объекта производства внутри участка, цеха, завода.

Оснастка – это в общем случае совокупность инструмента и приспособлений, дополняющих основное оборудование для выполнения технологического процесса. Оснастка может быть ориентирована на группу или класс изделий или быть индивидуальной, т. е. конкретной для данного изделия.

Одним из условий технологичности изделия является наличие оснастки для выполнения ТП. Если это условие соблюдается, то задача подготовки технологической оснастки сводится к документальному оформлению ее выбора. Однако не всегда это представляется возможным, и обработка нового изделия требует специальной технологической оснастки. Технологическая оснастка в этом варианте становится объектом проектирования. Ее создание является этапом в общем процессе технологической подготовки производства. В ряде случаев проектирование индивидуальной технологической оснастки включается в общий цикл конструкторского проектирования основного изделия. При этом проектирование оснастки может оказаться одним из главных в смысле трудоемкости.

При известном операционном процессе входными данными для проектирования индивидуальной оснастки является конструкторская документация на основное изделие, которая одновременно служит и для проектирования конкретного технологического процесса изготовления основного изделия (рис. 23). Оснастка чрезвычайно разнообразна по своей номенклатуре и способам использования. Поэтому ее проектирование является специальной задачей. Для понимания этой задачи ниже рассмотрены некоторые характерные примеры из области радиоэлектроники и машиностроения.

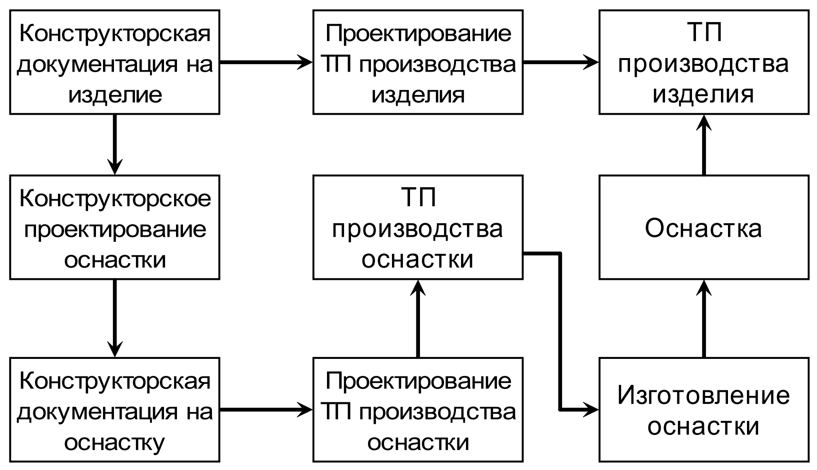


Рис. 23. Схема проектирования технологического процесса производства изделия с индивидуальной оснасткой

Управляющая технологическая программа (УТП) представляет собой набор команд-инструкций для автомата или станка, необходимый для выполнения той или иной производственной операции. Автоматизированное про-

изводство имеет свои достоинства как при серийном, так и при опытном производстве. Однажды разработанная управляющая технологическая программа далее неоднократно автоматически исполняется практически без вмешательства человека, при этом ускоряется процесс переналадки оборудования, повышается точность и сокращается время исполнения операций.

Замена ручных операций сверления печатных плат сверлением на автоматах сокращает время обработки в десятки раз.

В современных автоматах контроля монтажа контролирующее устройство имеет возможность одновременно обеспечить контакт со всеми выводами элементов электрической схемы, сконструированной по плате. Автомат последовательно опрашивает группы контактов одного потенциала, устанавливая их общность. Аналогичным образом можно установить отсутствие ложных коротких замыканий между группами контактов различного потенциала. Различие во времени выполнения операций традиционными ручными методами «прозвонки» цепей и автоматическими методами составляет примерно два порядка.

Надо заметить, что приведенные цифры, характеризующие относительный временной выигрыш, сугубо условны. По мере совершенствования техники, естественно, скорость выполнения операции автоматом будет увеличиваться, тогда как скорость выполнения ручных операций будет сохраняться в силу физиологических возможностей человека.

Станки и автоматы с ЧПУ потребляют в качестве информации управляющие программы и не нуждаются в графической и текстовой бумажной документации. Иначе говоря, бумажные документы как средство общения между проектировщиком и исполнителем заменяются в этом варианте информационным взаимодействием на уровне машинных кодов. Таким образом, появляется возможность перехода к безбумажной технологии производства и интеграции проектирования и производства. Это требует коренного пересмотра традиционно сложившихся форм взаимодействия между проектными и производственными подразделениями и соответственно форм и методов технологической подготовки производства.

Переход к гибкому автоматизированному производству (ГАП) выявляет ряд новых проблем и в первую очередь таких, как согласованное управление группой оборудования, в состав которого помимо технологического оборудования входят транспортные устройства и автоматизированные склады.

9. Определение технологического процесса

Задача проектирования оригинального ТП связана главным образом с процедурами структурного синтеза, а потому решать ее следует на основе автоматизированных методов в интерактивном режиме.

В зависимости от сложности объект может проходить различные маршруты обработки. Простые детали могут обрабатываться полностью на одном оборудовании без смены инструмента, обработка более сложных может требовать смены инструмента либо оборудования. Для таких изделий маршрут обработки будет проходить через несколько производственных участков или цехов. Если объект представляет сборочную единицу, узел или механизм, то помимо операций обработки он должен пройти операции сборки. Соответственно существуют иерархия технологических документов и уровни описания маршрута технологической обработки.

Естественно, что в любом случае описание технологического процесса должно быть доведено до конкретной операции (совокупности операций), выполняемой на рабочем месте на конкретном оборудовании. Подобное детальное описание является основным содержанием автоматизации проектирования технологического процесса. Документ, в котором оформлены эти сведения, носит название операционной технологической карты.

Технологическая карта сопровождается чертежом или операционным технологическим эскизом, в котором обрабатываемая деталь описана в графической форме с межоперационными (промежуточными) размерами, приобретаемыми деталью в процессе выполнения операций. Процесс обработки одной детали (объекта) может описываться одной или несколькими операционными картами, каждая из которых выдается на то или иное рабочее место.

В зависимости от уровня описания технологического процесса меняется степень детализации производственных операций. Так, для описания межцехового маршрута достаточно под операцией понимать класс операции: механообрабатывающая, заготовительная, операция термообработки и т. д., в зависимости от наименования цеха, через который проходит маршрут обработки. Описание маршрутных техпроцессов может детализироваться до типа операций: токарные, сверлильные, шлифовальные, фрезерные, электроэрозионные и т. д.

В процессе дальнейшего изложения целесообразно в качестве объекта технологической подготовки производства рассматривать деталь. Деталь является наиболее массовым объектом производства, ее рассмотрение проще и вместе с тем раскрывает все необходимые понятия, связанные с вопросами автоматизации технологической подготовки производства.

Маршрутный технологический процесс обработки детали представляет собой следующую семантическую конструкцию:

<маршрутный технологический процесс> = <описание детали> {<вид операции> <оборудование> <трудоемкость операции>} (9.1)

Описание детали дается в конструкторском чертеже и содержит геометрические характеристики, данные о материале и точности изготовления.

Маршрутный технологический процесс сопровождается при необходимости нормативными данными по трудоемкости каждой операции.

Описание технологического процесса (9.1) содержит, по сути, общие характеристики детали и спецификацию операции над заданной деталью и может служить исходным материалом для формирования конкретного процесса выполнения каждой операции, т. е. операционного процесса, описываемого на уровне совокупности переходов.

Переход может быть определен как элементарная операция с формально заданными реквизитами, достаточными для выполнения операции над конкретной деталью и на конкретном оборудовании. Укрупнено переход может быть представлен в виде семантической конструкции

<переход> = <оборудование> <вид операции> <оснастка> <обрабатываемая деталь> {<поверхность обработки (на переходе) > <параметры обрабатываемой поверхности детали до обработки> <параметры обработки> <параметры поверхности после обработки>}

<комментарии> (9.2)

Рассмотрим каждую из позиций семантической конструкции (9.2). <Оборудование> описывается типом станка, на котором выполняется операция; <вид операции> – наименование операции, в которой выполняется переход; <оснастка> включает описание приспособления и инструмента, необходимого для выполнения операции.

Реквизит <обрабатываемая деталь> обычно описывается в соответствии с действующими на предприятии классификаторами и содержит общие сведения о детали, ее габаритах, материале и т. д. Описание детали при ручной обработке может сопровождаться операционным эскизом детали, на котором указываются (размечаются) поверхности обработки.

Следующая группа реквизитов в конструкции (9.2) представляет собой упорядоченный список (кортеж) поверхностей, подлежащих обработке на данном переходе, их геометрические параметры (до и после обработки), чистоту обработки и допуска, а также параметры обработки для каждой поверхности. Параметры обработки описывают режим движения инструмента. Число параметров обработки зависит от числа степеней свободы станка. Параметры определяют поступательную скорость движения инструмента (составляющие по трем осям) и скорость вращения.

В <комментарии> включается вся необходимая информация для станочника-оператора, связанная с установкой детали и режимами обработки.

Рассмотренная семантическая конструкция (9.2) отражает содержательную часть перехода. Форма представления этой информации определяется технологической картой, которая помимо рассмотренных позиций имеет ряд служебных и паспортных характеристик, таких как дата, фамилии исполнителей и их подписи, децимальные (регистрационные) номера чертежей и объектов обработки и т. д.

Переход является, как уже говорилось, элементарной операцией с заполненными позициями, необходимыми для ее исполнения. Состав и содержание этих позиций определены конструкцией (9.2). Изменение любой позиции определяет новый переход.

Здесь уместна аналогия между технологической операцией и стандартной программной процедурой. Стандартная процедура имеет набор формальных параметров. После их простановки стандартная процедура из инварианта превращается в конкретную программу, которая встраивается в общий процесс вычислений.

Может быть определена формально и технологическая операция. Это в общем случае тоже некоторая абстракция и только после определения всех необходимых реквизитов, определяющих параметры объекта и способы его обработки, операция обретает конкретное содержание и может быть реализована в виде перехода общего технологического процесса обработки детали. Любое изменение в составе перехода, по сути, означает новое значение формальных параметров операции, т. е. новый переход.

Конкретный ТП обработки детали реализуется упорядоченным множеством переходов и может быть представлен в виде

<технологический процесс обработки> = {<переход>}, (9.3)

где конструкция перехода представлена (9.2). В упорядоченной цепочке (кортеже) переходов входом каждого перехода является деталь, прошедшая

операцию на предыдущем шаге обработки.

Исходными для формирования ТП обработки детали является укрупненный процесс обработки, представленный в виде упорядоченного маршрута движения детали от одного типа операции к другому (9.1). Каждая операция этого маршрута обретает конкретное содержание как минимум в одном переходе (рис. 24). При этом деталь расчленяется на элементы обработки – поверхности обработки или группы поверхностей обработки. Для некоторых операций элементом обработки может быть сама деталь.

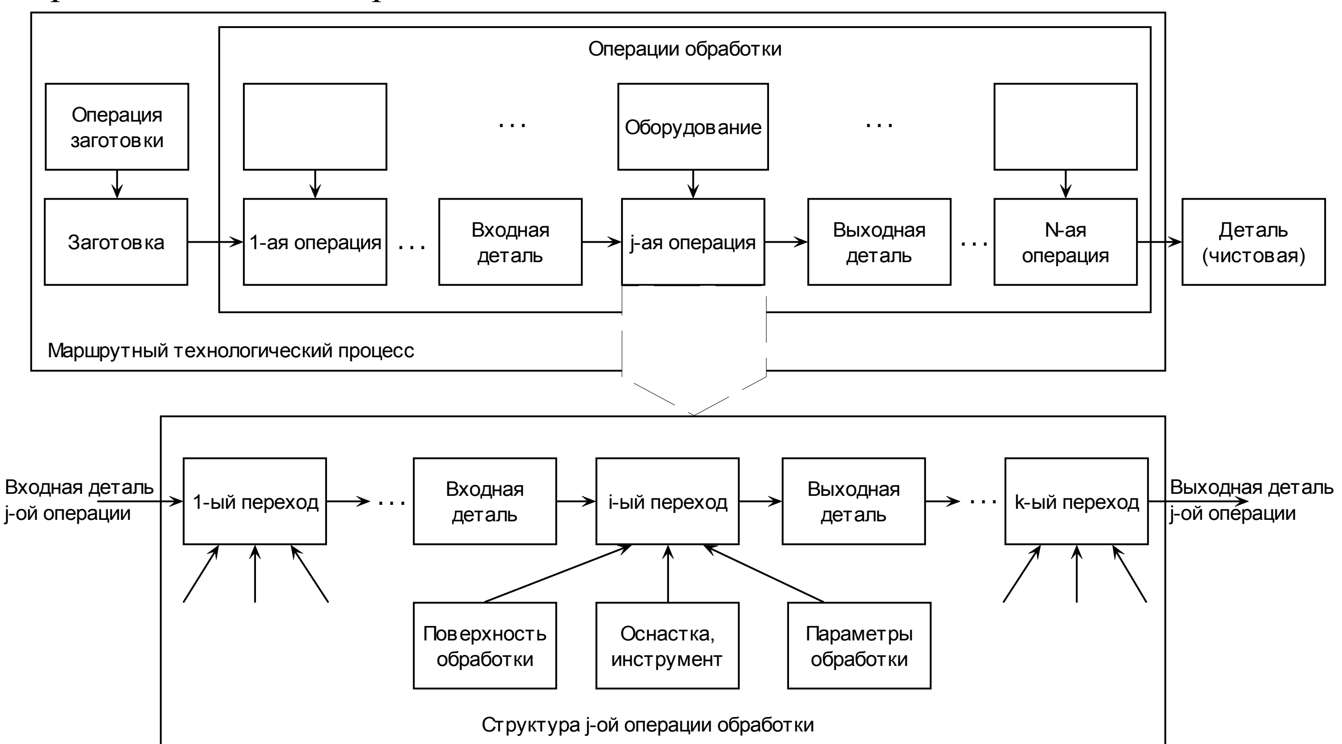


Рис. 24. Структура двухуровневого технологического процесса

Таково содержание ТП обработки детали, описанного на двух основных уровнях: маршрутного технологического процесса, представляемого совокупностью операций, и конкретного ТП выполнения операций, представляющего собой последовательность переходов.

10. Синтез технологических процессов

10.1. *База данных САПР технологических процессов и описание детали*

Методы структурного синтеза технологических процессов в той части, в которой возможна их реализация в САПР ТП, опираются на аппарат математической логики, основанный на изоморфизме элементов множеств, т. е. на установлении структурного соответствия элементов одной группы множеств элементам другой группы множеств. В данном случае мы устанавливаем взаимосвязь между элементами исходной семантической конструкции, описывающей деталь, и элементами структуры ТП, рассмотренных выше.

Элементы ТП (операции и переходы) являются, в свою очередь, сложными конструкциями, иногда с несколькими уровнями вложений, а потому задача формирования ТП не может решаться установлением простого соответствия между элементами детали и элементами ТП того или иного уровня.

Основу любого структурного синтеза составляют операции, реализуемые над элементами базы данных, которая является составной частью САПР. База данных по своему содержанию всегда конкретна и обслуживает проектные задачи вполне определенной предметной области.

Раскроем содержание задач синтеза ТП на примере деталей механообработки. В состав базы данных для такой САПР ТП должны входить базовые элементы, сгруппированные в следующие разделы: <вид операции>, <оборудование>, <инструмент>, <исходные заготовки>, <приспособления>, <режим обработки>.

Внутри каждого раздела базы данных осуществляется классификация по ряду признаков. Например, группа базовых элементов раздела <вид операции> делится на операции механообработки и измерения, заготовительные операции и т. д. Внутри подгруппы операций механообработки дается более тонкая классификация по способам обработки: сверление, расточка, фрезерование, шлифовка и т. д. Внутри классификационной группы «фрезерование» выделяются иерархические уровни по точности обработки.

Так, по разделу базы данных, связанному с операциями, формируется структура в виде графа, вершинам которого соответствуют определенные признаки. Далее эти признаки являются сопровождающими реквизитами конкретной операции, т. е. каждому виду операции присваивается совокупность признаков:

<вид операции> = {<признаки операции>} (10.1)

Совокупность признаков является аппаратом, используемым при установлении связи как внутри базы данных, так и между описанием детали и базой данных. Аналогичное структурирование данных должно быть проведено по остальным разделам базы данных САПР ТП. Результатом такого структурного представления являются конструкции типа (10.1).

Нетрудно видеть, что рассмотренные разделы базы данных семантически взаимно увязаны (обусловлены) и образуют сетевую структуру. Например, <вид операции> определяет реквизиты <оборудование>, <инструмент>, <приспособление>. При этом возможен не один, а несколько вариантов связок, в которых уже заложены элементы структурного синтеза. Эти связки реализуются соответствующим аппаратом организации данных.

Важнейшим в задаче синтеза технологического процесса является определение семантики описания детали, необходимого для входа в САПР ТП. На этапе конструкторского проектирования деталь может интерпретироваться как совокупность граней (5.1), (5.2). Для обработки детали конечное содержание технологического процесса определяется семантической конструкцией перехода (8.2). На основе конструкторского описания в (8.2) непосредственно может быть установлено два реквизита: <обрабатываемая деталь> и совокупность {<поверхности обработки>} детали.

Суть последующих задач синтеза заключается в установлении всех остальных реквизитов каждого перехода (8.2) в терминах библиотеки базовых элементов и всей совокупности технологического процесса (8.3). Для решения этой задачи каждая поверхность обработки и детали в целом помимо

геометрических параметров должна иметь ряд параметров, определяющих технологию их обработки. Простейшим является случай, при котором детали и поверхности дополняются характеристиками по допускам и точности обработки. Эти характеристики обычно приводятся в комментариях к конструкторскому чертежу. На основе подобного описания детали САПР ТП должна синтезировать технологический процесс ее изготовления. Естественно, что последний вариант с позиции проектировщика технологического процесса является наименее трудоемким, однако возможность реализации его достаточно проблематична, поскольку в подобном описании детали отсутствуют признаки, на основе которых можно однозначно установить реквизиты библиотеки базовых элементов САПР ТП, необходимые для формирования (8.2) и (8.3).

Исходя из этого в зависимости от уровня алгоритмов синтеза, используемых в САПР ТП, и степени детализации разделов баз данных выбирается содержание (семантика) описания детали. Вариантом формального описания детали является ее представление в виде ранжированной системы поверхностей. При этом каждой поверхности дополнительно к конструктивным параметрам присваиваются признаки типа поверхности, точности обработки и допуска.

Классификационные признаки типа поверхности могут быть сложными. Например, тип поверхности – цилиндрический, а цилиндрическая поверхность может быть концентрической, эксцентрической и т. д. Поверхности детали нумеруются. Номер является синонимом имени поверхности в данной детали и служит указанием на порядок выполнения операций при обработке поверхностей.

В подобной форме семантическая конструкция входного описания детали имеет вид:

<деталь> = <имя детали> <признаки детали> <признаки заготовки> {<номер поверхности> <признаки поверхности> <параметры поверхности>}. (10.2)

В качестве признаков детали здесь должны выступать самые общие ее характеристики:

<признак детали> = <плоская деталь> | <объемная деталь> | <тела вращения> | <габариты>

и подобные этим наиболее общие реквизиты.

Главным содержанием признака заготовки являются способ формообразования (отрезка от прута, штамповка, прессование, литье и т. п.) и материал.

Основная информация о детали сосредоточена в последнем кортеже, включающем упорядоченную последовательность описаний поверхностей. Здесь внутренние элементы конструкций кортежа являются также упорядоченными списками, т. е. <признаки поверхности> = {<признак поверхности>}, и аналогично <параметры поверхности> также определяются упорядоченным списком геометрических размеров обрабатываемой поверхности и параметрами обработки.

10.2. *Принципы синтеза технологических процессов*

Задача структурного синтеза ТП решается на основе установления соответствия между отдельными элементами описания детали и различными разделами базы данных САПР ТП. Согласно изложенному выше база данных системы проектирования ТП может быть представлена в виде некоторой совокупности разделов, ориентированных на определенный класс объектов производства:

<база данных САПР ТП> = <операции> <оборудование> <инструменты> < приспособления > <исходные заготовки> <режимы обработки> (10.3)

База данных может пополняться при необходимости другими разделами.

Простейшим вариантом использования баз данных для задачи синтеза является локальное рассмотрение каждого раздела. В этом варианте связь между всеми информационными элементами исходного описания детали и разделов базы данных проектировщик осуществляет интуитивно, используя базу данных в качестве справочного материала. Последовательно вызывая разделы или части разделов, он устанавливает цепочку технологических операций. В этом случае соотношение (связь) локальных решений, принимаемых на каждом шаге, осуществляется неформально.

Для формализации процесса синтеза ТП условия соответствия между отдельными элементами разделов базы данных систематизируются и реализуются с помощью ссылочных сетей. Последнее означает, что каждый элемент раздела содержит в каталоге или в своем описании ссылки на элементы других разделов. Так, в базе данных каждой конкретной операции раздела того же наименования может быть поставлено в соответствие некоторое подмножество из разделов <оборудование>, <инструмент>, <приспособление> и <режим обработки>.

В результате реализации операций соответствия между реквизитами детали (10.2) и базой данных определяются подмножества каждого раздела базы данных (рабочие массивы), на основе которых осуществляется далее структурный и параметрический синтез ТП (9.3).

Первым шагом структурного синтеза является формирование маршрутного технологического процесса. Основу маршрута обработки детали составляют упорядоченные совокупности пар реквизитов

{<вид операции> <оборудование>} (10.4)

Формирование совокупности пар требует установления соответствия (10.4) на образованных подмножествах рабочего массива (РМ), выборки конкретных экземпляров пар и их последующего ранжирования. Формирование РМ, формирование пар и их ранжирование являются синтетическими процедурами и могут выполняться как алгоритмическими (формальными) методами, так и на основе использования интерактивных режимов. Конкретная пара <операция> <оборудование> выбирается автоматически при вводе дополнительных, ранее не использованных реквизитов в описании детали путем тех же операций соответствия. При интерактивных режимах технологу могут выдаваться все варианты решений. Отбор нужного варианта осуществляет чело-

век. В этом случае им может быть учтено большее количество условий, в том числе и связанных с загрузкой оборудования.

Что касается ранжировки операции в (10.4), то эта процедура может быть принципиально формализована на основе специального логического алгоритма, определяющего разрешенную последовательность выполнения операций. Однако, как и всякие подобные процедуры, эти операции имеют узкоспециализированную ориентацию. Для каждого нового набора необходима своя последовательность. Появление новой операции требует пересмотра логики ранжирования. Исходя из этого операцию ранжирования целесообразно выполнять проектировщику процесса на этапе описания детали соответствующей разметкой (нумерацией) поверхностей.

Результатом формальных методов синтеза технологического процесса может оказаться множество технологических процессов, маршруты которых проходят через различное оборудование. Каждый из технологических маршрутов обработки является допустимым, и дальнейшая задача синтетических процедур заключается в выборе на этом допустимом множестве технологических процессов наиболее выгодного. Для этих целей необходима система количественных оценок. К таким оценкам в первую очередь должны быть отнесены суммарная стоимость процесса и время его исполнения. Последняя оценка требует учета загрузки оборудования другими технологическими процессами. Задача здесь переходит из области проектирования технологического процесса в область организации управления технологическими процессами обработки группы заявленных объектов, и решение ее требует создания модели производства. Модель анализирует маршрутные процессы на уровне систем массового обслуживания. На множестве возможных реализаций заявок на обслуживание строится оптимальная в указанном смысле совокупность технологических процессов.

Результатом первого этапа синтеза ТП является отработанный маршрут движения детали от оборудования к оборудованию (9.1). Вторым этапом синтеза ТП является структурный синтез операционного технологического процесса обработки детали, состоящего из ранжированного набора переходов (9.3). Принципиально в одной операции технологического маршрута, как уже указывалось, может выполняться несколько переходов.

Задача формирования ТП обработки детали представляет собой совокупность задач структурного и параметрического синтеза. Задача структурного синтеза как по содержанию, так и методу решения близка к рассмотренной задаче первого этапа синтеза, рассмотренной выше. Результатом структурного синтеза ТП обработки детали являются переходы и их ранжировка. Каждый из переходов при этом имеет определенные реквизиты, т. е. элементы семантической конструкции (9.2). Внутри образованной структуры возможны постановки задач синтеза параметров, например межоперационных параметров детали.

Согласно определению переходом является формально определенная часть технологической операции, выполняющая обработку входной заготовки с доведением этой заготовки до требуемых характеристик постоянным набором средств (инструмента, приспособления). Если процесс обработки поверхности является одношаговым, то требуемые характеристики определяются чертежом детали с соответствующими параметрами обработки по допускам и чистоте и достигаются исполнением одного перехода. Если процесс

не одношаговый, то доведение параметров поверхности исходной заготовки до требуемых, т. е. определяемых чертежом детали, осуществляется группой переходов. При этом переходы могут быть не однотипными. Простейшим примером может служить поверхность тела вращения, требующая высокой точности и чистоты обработки. Над ней должны выполняться токарные операции и операции шлифования. В зависимости от материала детали, толщины снимаемого слоя, требуемой чистоты поверхности ТП обработки может включать несколько переходов токарной операции и несколько переходов шлифовальной операции. Каждый переход должен заканчиваться выполнением требований по межоперационным параметрам детали, вернее, межпереходным параметрам.

При неформальных методах проектирования ТП подобные межоперационные параметры детали (геометрические размеры, допуски и чистота поверхности), которые должны быть у нее после выполнения каждого перехода, задаются соответствующим рабочим эскизом детали, выполняемым вручную. При формальных методах эта задача должна решаться алгоритмически. Алгоритм, реализующий синтез параметров операционных переходов, имеет в качестве входных данных описания детали в конечном ее исполнении и исходной заготовки.

Рассмотрим задачу синтеза межоперационных параметров (рис. 25). При заданной структуре ТП синтез параметров осуществляется с помощью модели, определяющей связь между межоперационными параметрами детали и показателями качества ТП, в качестве которых принимаются: чистота Δ, допуск D чистовой детали, а также время T и стоимость G ее обработки. Подбором межоперационных параметров может быть достигнуто условие, наиболее благоприятное по одному из показателей (например, минимум времени обработки) при соблюдении выполнения требований по чистоте, допуску и стоимости. Это типичная постановка поисковой задачи параметрического синтеза.

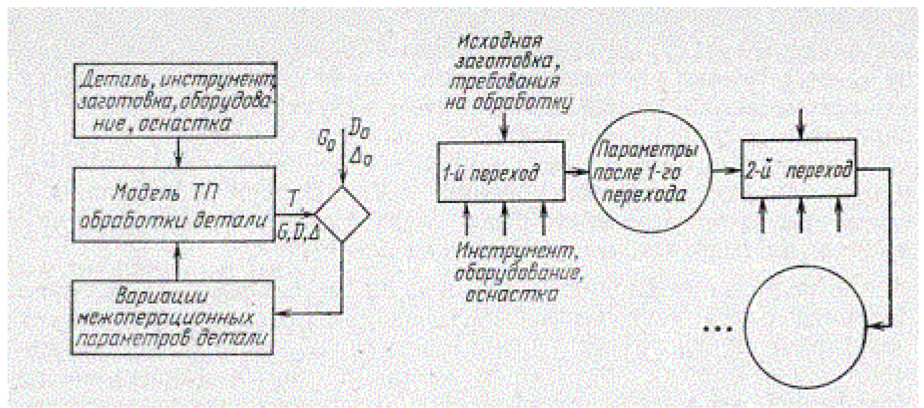


Рис. 25. Схема поиска межоперационных параметров детали

Рис. 26. Схема последовательного расчета межоперационных параметров

Рассмотренная схема синтеза не единственная. Возможен переход от

общей поисковой задачи синтеза к более простой, при которой она решается последовательно, начиная с первого перехода, где вход (заготовка) определен (рис. 26). Последняя постановка предполагает возможность декомпозиции и независимого решения задачи синтеза параметров для каждого перехода по частным критериям. Начинать при этом следует от первого перехода и далее наращивать процесс до получения требуемых результатов по детали. Подобный последовательный вариант формирования ТП является наиболее простым и естественным, однако исключает возможность вариации межоперационных параметров обработки с целью достижения наилучших показателей для всего ТП.

Подведем итог сказанному. Задача синтеза ТП обработки детали представляет собой последовательность решений задач структурного и параметрического синтеза технологических процессов. Формальное описание детали является заданием на формирование ТП. Задачи структурного синтеза решаются на основе базы данных САПР ТП и исходного описания детали путем установления связей между элементами разделов базы данных и реквизитами описания детали.

Задача установления ссылочных связей является центральнойв вопросах структурного синтеза. На этой основе строится алгоритм синтеза ТП. Связи могут устанавливаться ссылками внутрибазы данных, алгоритмом структурного синтеза, разработчикомТП в интерактивном режиме. Ссылки являются перекрестными, т. е. предполагают возможность соответствия между любыми элементами. Чем более детализированы эти связи, тем определеннеезадача структурного синтеза. Для рассматриваемого случая характерными являются связи типа



Формирование ТП заключается в построении его избыточной структуры, ветви которой являются допустимыми решениями. Для диалоговых режимов на этой избыточной структуре разработчик выбирает нужную структуру. При наличии формальных критериев отбора подобная задача может решаться на основе алгоритмических методов.

После завершения структурного синтеза решается задача параметрического синтеза, одна из которых, связанная с выбором межоперационных параметров, рассматривалась выше (рис. 25, 26).

Рассмотренная последовательность процедур синтеза ТП может быть

представлена в виде схемы (рис. 27), входом которой является описание детали, а выходом – ТП ее обработки.

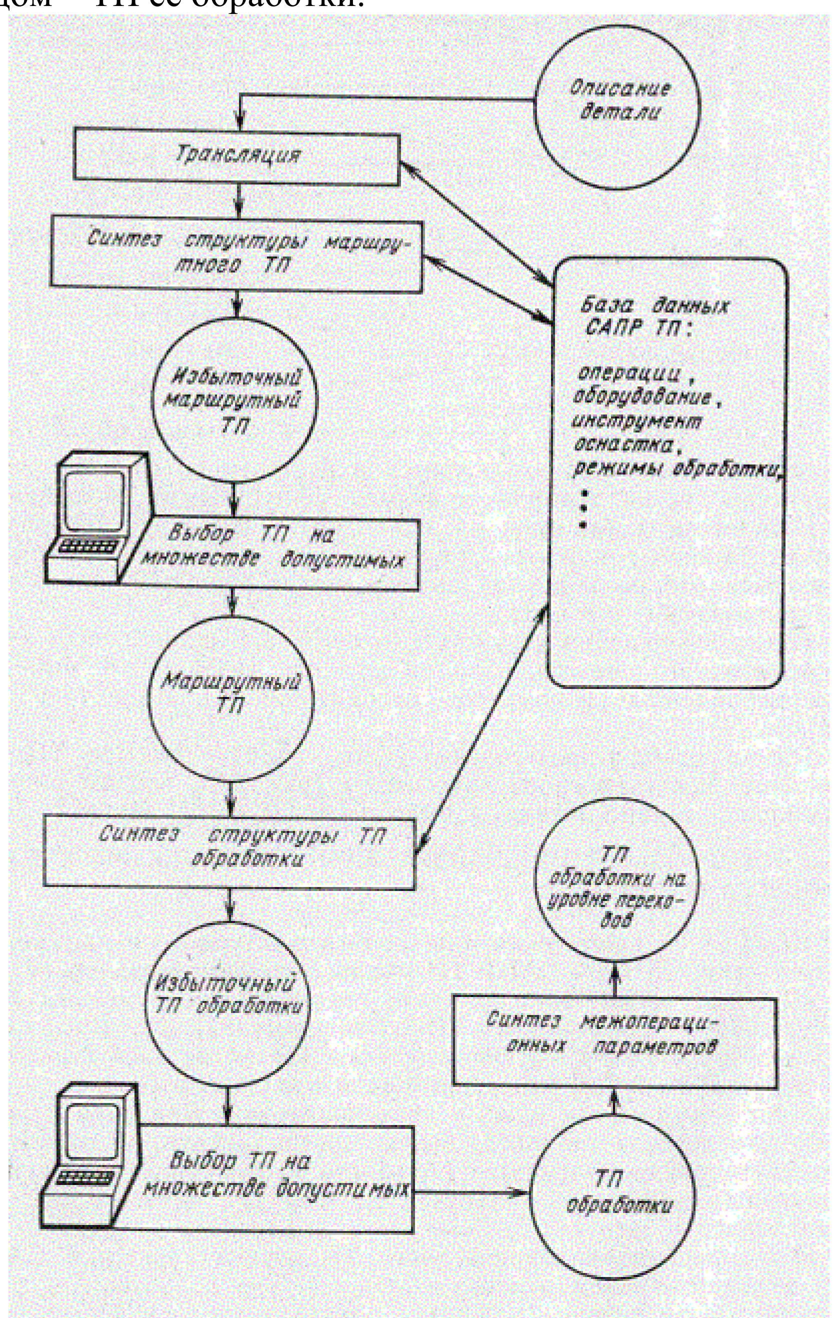


Рис. 27. Схема синтеза технологического процесса

10.3. *Формирование индивидуального технологического процесса по типовому*

Конкретная реализация принципов структурного и параметрического синтеза ТП в САПР ТП может быть самой различной.

Широкое применение получили так называемые методы формирования индивидуальных ТП по типовым. Суть методов заключается в следующем. Из множества деталей выбирается некоторая группа, имеющая общие признаки и соответственно способы обработки и единые типы заготовок. Для этой группы деталей определяется обобщенная модель детали, включающая все многообразие элементов обработки рассматриваемой группы. По обобщенной модели строится типовой ТП, который является избыточным.

Формирование индивидуального ТП осуществляется в САПР ТП в интерактивном режиме взаимодействия пользователя с системой. Пользователь (в данном случае технолог) классифицирует деталь, т. е. определяет ее принадлежность к той или иной группе деталей, по которой имеются типовые ТП. Затем чертеж соответствующей обобщенной детали с разметкой (номерами) элементов обработки (рис. 28) отражается на экране дисплея. Технологом задаются номера элементов обработки, имеющиеся в проектируемой детали.

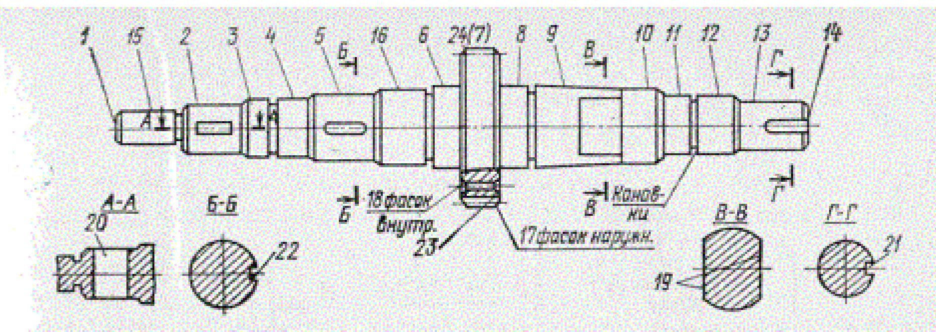


Рис. 28. Пример типовой избыточной детали
с разметкой поверхностей (элементов) обработки

По этой входной информации на основе выделения из избыточного ТП нужных ветвей формируется структура индивидуального технологического процесса. Ряд позиций этого процесса может требовать доопределения. К ним в первую очередь относятся все метрические параметры, связанные с межоперационными размерами и режимами обработки. Типовая (избыточная) деталь содержит все возможные варианты исполнения структуры конкретной детали. Однако параметры проектируемой детали (геометрические размеры, чистота обработки, допуски) конкретны. Это обстоятельство не позволяет решать задачу синтеза ТП простым усечением избыточного ТП.

Смысл сказанного достаточно просто можно пояснить на примерах. От геометрических параметров детали зависит инструмент обработки. То же следует сказать о чистоте обработки и о допусках. Материал детали влияет на режимы резания (скорость подачи, скорость вращения и т. д.). С чистотой обработки связаны как выбор инструмента, так и число его проходов по обрабатываемой поверхности. Наконец, что весьма важно, от геометрических параметров детали зависят межоперационные размеры. Из изложенного следует, что параметры конкретной детали требуют соответствующей редакции (или заполнения) реквизитов индивидуального ТП.

Таким образом, после первого шага пользователя, связанного с описанием структуры конкретной детали, формируется прототип индивидуального ТП обработки этой детали. Здесь под прототипом следует понимать ТП, имеющий семантическую конструкцию, соответствующую индивидуальному (синтезируемому) ТП, но с реквизитами, требующими в общем случае редакции (или заполнения).

Задача диалоговой САПР заключается в определении этих реквизитов и формировании необходимой информации в диалоговом сценарии (типа подсказки) для решения задачи синтеза индивидуального ТП на основе его

прототипа. Подсказка может быть прямой (в виде набора допустимых вариантов заполнения реквизитов) или в виде списка процедур, с помощью которых осуществляется выбор реквизита или его конкретных параметров. Схема сценария, диалога синтеза индивидуального ТП на базе типового представлена на рис. 29.

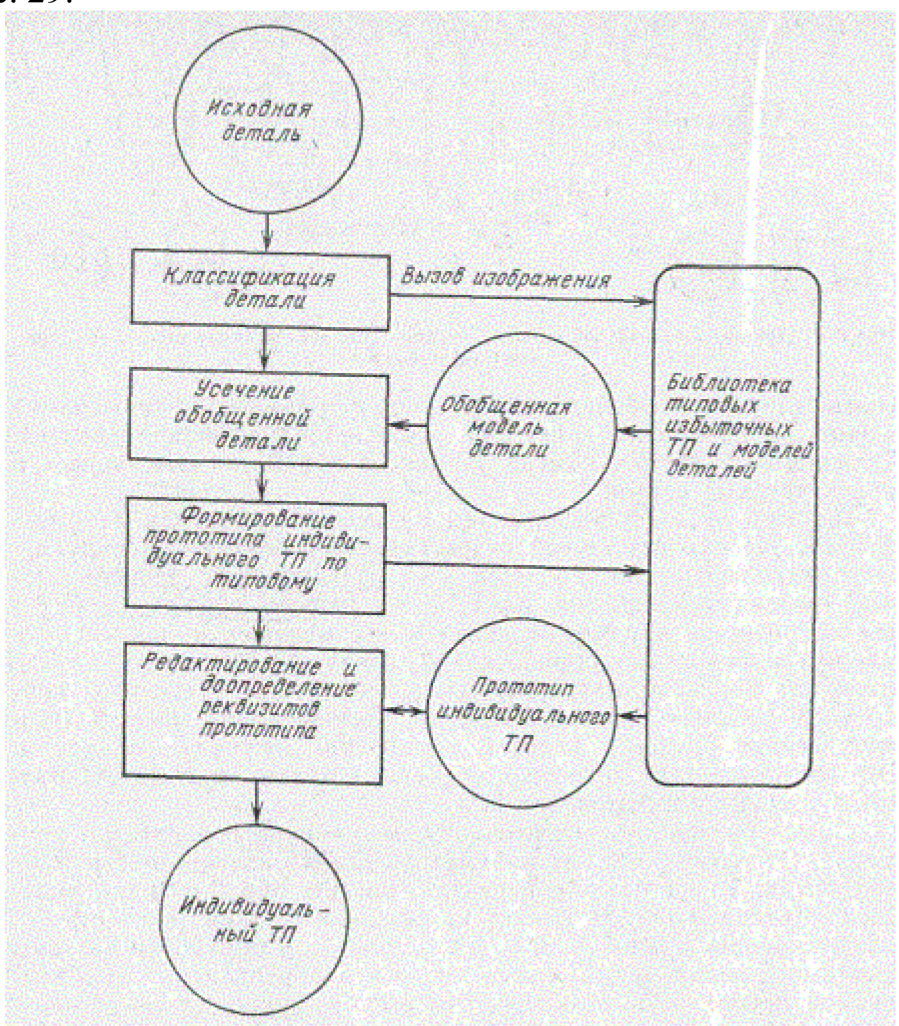


Рис. 29. Схема диалогового синтеза индивидуального технологического процесса по избыточному

11. Проектирование оснастки производства рэа

В радиоэлектронике одним из главных объектов конструкторского проектирования являются печатные платы, микросборки и интегральные микросхемы. Несмотря на существенную разницу в плотности размещения активных и пассивных компонентов, в этих трех типах конструктивов имеется много общего. Эта общность связана с конструкторско-технологическим проектированием всех видов конструктивов, в том числе с методами проектирования технологической оснастки.

Проектирование микроскобок и печатных плат по составу решаемых задач проще, чем проектирование интегральных схем. Главная причина связана с необходимостью в последнем случае конструировать не только связи между компонентами схемы, но и сами компоненты. Переход на матричные БИС существенно сближает эти проектные задачи, поскольку в этом случае базовая матрица, на которой размещается будущая БИС, уже представляет

собой набор стандартных элементов, из которых собирается (компонуется) необходимая схема. Компоновка конкретной схемы на этом множестве, по сути, эквивалентна размещению корпусных или бескорпусных элементов на подложке. Поэтому рассмотрим в качестве примера лишь печатную плату.

Печатная плата представляет собой ряд слоев (подложек), выполненных из диэлектрика, на которые методом фотолитографии наносятся печатные трассы, объединяющие отдельные точки каждого слоя. Межслойные связи и связи с контактами навесных элементов обеспечиваются металлизированными межслойными переходами. Последние выполняются в виде металлизированных отверстий. Широкое применение находят двуслойные платы, в которых на одной диэлектрической подложке с обеих сторон наносятся коммутирующие печатные трассы. При многослойном исполнении платы обычно поступают следующим образом. На наружном слое (или двух наружных слоях) предварительно размещают элементы. Под все контакты, подлежащие соединению, пробивают сквозные отверстия, которые далее металлизируются, т. е. делаются проводящими. Затем решается основная топологическая задача: прокладка в каждом слое непересекающихся трасс, обеспечивающих связи в соответствии с исходной принципиальной схемой. Объединение групп связей одного потенциала, выполненных в различных слоях, осуществляется с помощью указанных выше сквозных металлизированных отверстий.

Решение задачи размещения и многослойной трассировки является основной задачей конструкторского проектирования печатной платы. В результате этого этапа рождаются конструкторские документы; компоновочный чертеж размещения электрорадиоэлементов, таблица размещения соединительных трасс по слоям платы, таблица координат отверстий, необходимых для рассверливания и последующей металлизации. В САПР вся информация по этапу конструкторского проектирования предварительно засылается в архив, где хранится в стандартной форме на языке графической и текстовой документации (ЯГТИ). Эта информация служит одновременно и для формирования технологической документации, и для изготовления производственной оснастки.

При развитом автоматизированном производстве осуществляется переход на уже упомянутую безбумажную технологию. Компоновочный чертеж заменяется управляющей программой для автомата сборки ячейки, таблица сверления – программой для автомата сверления и, наконец, таблица послойных трасс – управляющей программой для автомата изготовления послойных фотошаблонов (рис. 30). Эти фотошаблоны и являются индивидуальной оснасткой для данной платы.

На схеме (рис. 31), отображающей рассмотренные процессы безбумажного обмена в сквозном цикле конструкторско-технологического проектирования, конструкторская документация в традиционной ее форме отсутствует. Ее представляет информация машинного архива, выполненная в форматах ЯГТИ.

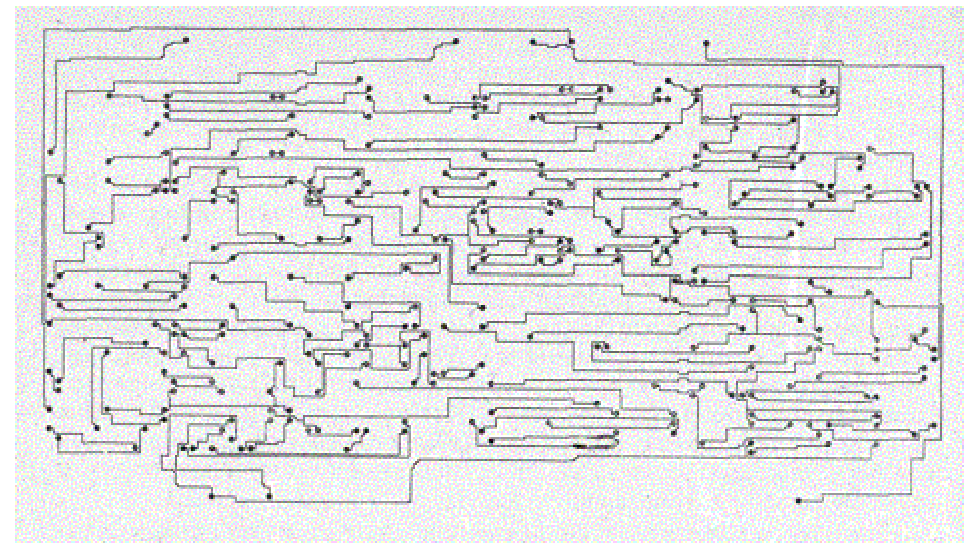


Рис. 30. Фотошаблон

Управляющие технологические программы для сборки и сверления являются технологической документацией по основному изделию (плате). Конструкторской документацией для оснастки (фотошаблона) является упомянутая послойная информация архива. На ее основе создается технологическая документация на изготовление оснастки (фотошаблона) с помощью специального постпроцессора, переводящего графическую информацию с языка ЯГТИ в кодовую форму представления для координатографа, исполняющего фотошаблон.

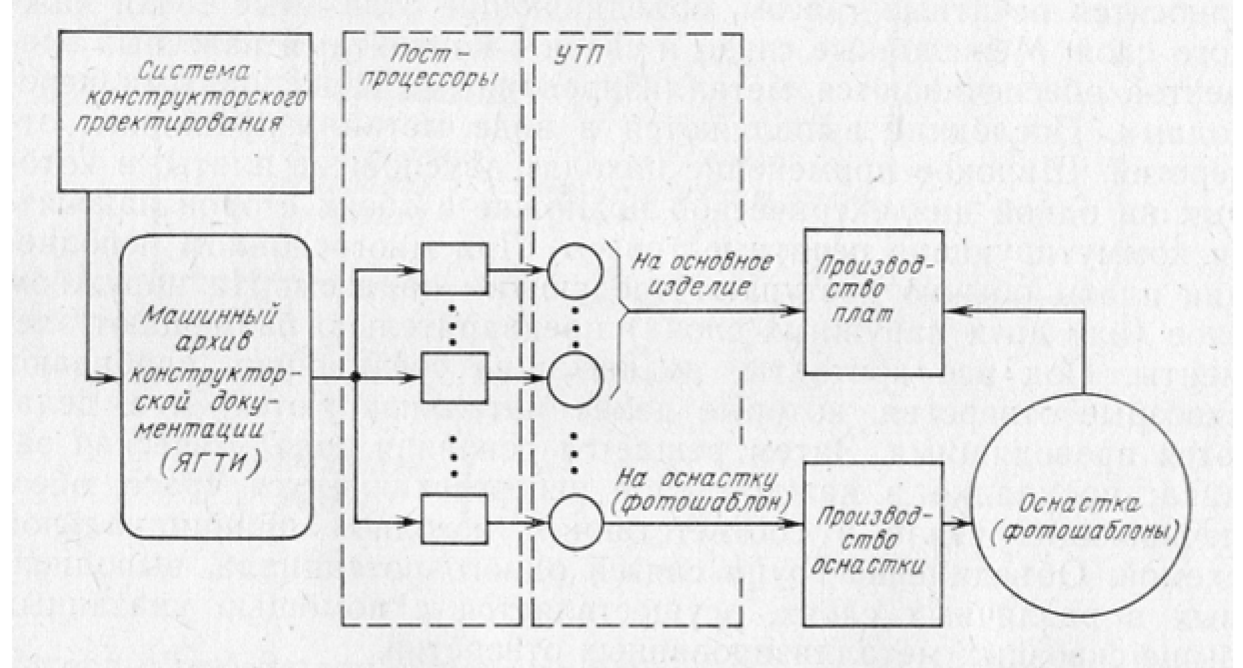


Рис. 31. Схема безбумажного обмена документацией при сквозном конструк-торско-технологическом проектировании печатных плат

12. Автоматизация проектирования штампа

Другим характерным примером проектирования индивидуальной оснастки из области механических изделий являются штампы. Штампы – сложные технологические приспособления, которые служат оснасткой для процессов различного типа.

Формирование деталей на основе штамповочных операций является по современным представлениям одним из наиболее совершенных способов формообразования и обеспечивает высокую производительность ТП. Однако штамп обычно существенно сложнее детали, для изготовления которой он разрабатывается. Поэтому использование штампов возможно при условии, во-первых, достаточно большой серии выпускаемых деталей и, во-вторых, при хорошо отработанных процессах проектирования штампов и автоматизированном изготовлении его элементов. Последнее может быть реализовано средствами автоматизации.

Как объект автоматизированного проектирования штамп по ряду аспектов представляет несомненный интерес, поэтому рассмотрим его в качестве методического примера. Штампы по современной классификации имеют чрезвычайно широкую номенклатуру. По характеру выполняемых операций можно выделить следующие основные группы штампов: разделительные, гибочные, вытяжные, холодного прессования (выдавливания). Имеется ряд штампов, выполняющих специальные операции. Каждая из групп имеет свою классификацию. По принципу действия штампы могут выполнять одну операцию или быть многооперационными. Многооперационные, в свою очередь, делятся на штампы последовательного выполнения операций и штампы совмещенного действия.

Штампы разрабатываются под изготавливаемую деталь, т. е.основные рабочие элементы штампа по своему профилю должнысоответствовать чертежу детали. Штамп вместе с тем являетсяоснасткой пресса, а потому его внешняя конфигурация и размерыдолжны соответствовать станине и параметрам подвижной части (ползуну) пресса. Точность изготовления детали предъявляет требования к точностям изготовления деталей штампа и сборочным операциям. Это требование должно найти отражение в конструкторской документации и технологическом процессе. Материал детали и ее толщина определяют выбор усилий пресса и соответственно силовых конструкций штампа.

Форма заготовки, из которой изготавливается деталь, также определяет ряд конструктивных элементов штампа. К ним в первую очередь относятся специальные фиксаторы, обеспечивающие строго определенное положение заготовки в процессе выполнения операции. Формы детали и исходной заготовки определяют конструкцию съемных приспособлений штампа, необходимых для удаления отработанных детали и заготовки. Таковы некоторые основные взаимосвязи, определяющие алгоритм проектирования деталей штампа.

Более подробно конструкция штампа и способ его проектирования с использованием САПР могут быть рассмотрены на примере разделительного штампа. Разделительный штамп принадлежит к широкому классу прессовой оснастки, выполняющей операции вырубки детали по заданному контуру из различного материала, вырубку в детали необходимых полостей и отверстий. Подобные операции объединены общим названием разделительные операции, поскольку при этом от исходной заготовки (полосы) отделяются эле-

менты требуемой конфигурации, которые далее могут служить заготовкой для последующих операций вырубки полостей. Обычно если полостей в детали немного (одна, две), операция вырезки по контуру и вырубка полостей осуществляются одновременно, т. е. имеет место штамп совмещенного действия.

На детали, изображенной на рис. 32, заготовкой служит лента, фиксируемая на рабочей плите с помощью фиксаторов. Вырезка детали из ленты осуществляется с помощью пуансона и матрицы (рис. 33), которые представляют собой основные рабочие элементы штампа. В центре детали необходимо вырезать окно. В штампе совмещенного действия вырезка окна и вырезка по контуру выполняются одновременно. Осуществляется это с помощью совмещенной пуансон-матрицы (рис. 34), представляющей собой основной пуансон, в котором размещается матрица для пробивки отверстия. В теле основной матрицы имеется отверстие, в которое пропускается второй пуансон – пуансон-матрица.

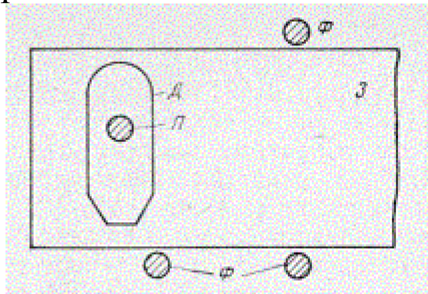


Рис. 32. Деталь *Д* с вырубаемой полостью *П*, заготовка полосы материала *З* и ее фиксаторы *Ф* на рабочей плате

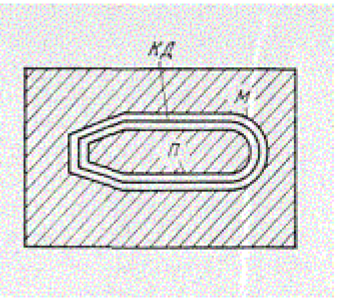


Рис. 33. Внешние контуры режущих кромок пуансона *П* и матрицы *М*; *КД* – кромка обрабатываемой детали

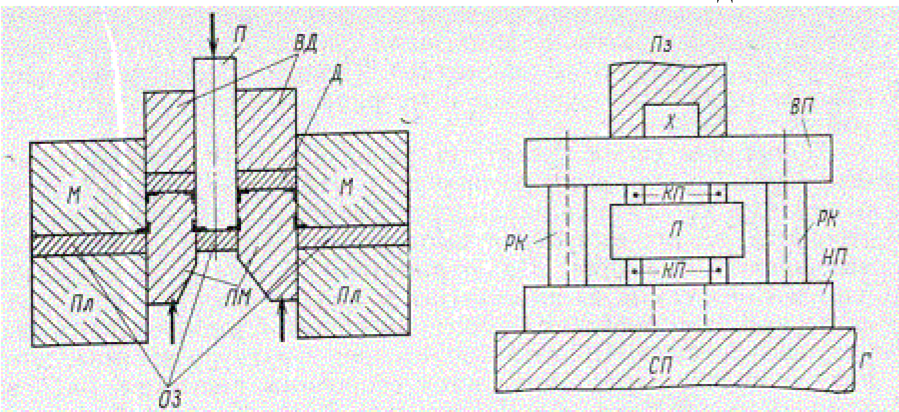


Рис. 34. Рабочие элементы пакета разделительного штампа совмещенного действия: *ПМ* – пуансон-матрица; *П* – пуансон; *М* – матрица; *Д* и *ОЗ* – деталь и остатки заготовки; *Пл* – плита (рабочая); *ВД* – выталкиватели детали; ↑ – направление движения; утолщенной линией выделены режущие кромки

Рис. 35. Блок штампа: *П* – пакет с рабочими элементами; *КП* – крепление пакета в верхней и нижней плите блока (*ВП*, *НП*); *РК* – раздвижные колонки блока; *Пэ* – ползун пресса, соединенный с хвостовиком блока *Х*; СП – станина пресса

Таков состав основной режущей части разделительного штампа. Помимо этого непосредственно с подвижными элементами режущей части

взаимодействуют прижимные плиты, выталкиватели, обеспечивающие фиксацию материала в зоне его деформации, выброс детали и отходов заготовки (рис. 34). Взаимодействующие элементы штампа крепятся в специальных держателях. Соосность подвижных частей и их взаимное перемещение обеспечиваются направляющими штифтами. Все эти рассмотренные элементы, собранные в определенную конструкцию, образуют сменную часть штампа, которая называется пакетом.

Пакет устанавливается в блоке штампа (рис. 35). Блок состоит из двух частей: верхней и нижней. Верхняя и нижняя плиты связаны между собой раздвижными колонками. На верхней и нижней плитах крепятся резьбовыми соединениями соответствующие части пакета. Верхняя плита с помощью хвостовика жестко связана с ползуном пресса. Нижняя плита блока устанавливается в зажимах на станине пресса.

Задача проектирования штампа обычно связывается с выбором его прототипа, на основе которого осуществляется конструкторский синтез и выпуск комплекта документации на изготовление и сборку. В комплект документации входят сборочный чертеж штампа, чертежи деталей и спецификация на комплектующие изделия. Штамп средней сложности имеет порядка полусотни деталей, на каждую из которых, если она не покупная, надлежит выпустить конструкторский чертеж. Основу оригинальной части штампа составляют пуансоны и матрицы, а также фиксаторы заготовки и съемники.

Примерная схема проектных работ в САПР штампов может быть представлена в следующем виде. На основе конструкторского чертежа детали и ее параметров выбирается заготовка, рассчитываются усилия вырубки и выбирается тип пресса, на котором выполняется операция. По параметрам пресса и детали выбирается тип штампа из имеющегося в наборе. На этом завершается первый этап проектных работ, связанный с выбором прототипа будущего штампа. Прототип определяет структуру штампа, которая документально отображается сборочным чертежом, набором комплектующих деталей и их чертежей.

Вторая часть проектных работ в САПР штампов связана с конструкторским синтезом оригинальной части штампа, выбором размеров синтезируемых элементов и соответствующим оформлением чертежей. При наличии автоматизированного производства в системе формируются управляющие программы для обработки деталей штампа. Для рассмотренного выше варианта вырубного штампа совмещенного действия (рис. 34) оригинальными элементами являются матрица, пуансон-матрица и пуансон.

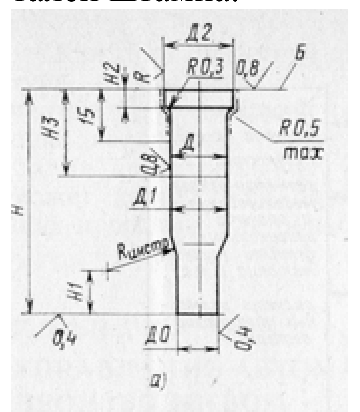
Конфигурации (структура) этих элементов определяются исходным чертежом вырубаемой детали (рис. 32). Конкретные параметры плюсовых или минусовых отклонений контуров режущих кромок рабочих элементов определяются требуемой точностью обработки, материалом и толщиной детали, твердостью режущей части пуансона и матрицы.

Все эти соотношения между входными данными и параметрами рабочих элементов определяются нормативными документами. В САПР штампов расчеты параметров рабочих элементов оформляются в виде программных

процедур, реализующих табличные либо алгоритмические зависимости между входными данными и параметрами. Алгоритмы определяются прочностными зависимостями либо получаются путем аппроксимации соответствующих табличных зависимостей. Подобные процедуры в САПР обычно обслуживают группы штампов одного назначения. В простейшем варианте каждый штамп из множества представленных в библиотеке САПР прототипов обслуживается своей самостоятельной группой расчетных процедур.

Кроме параметров режущих кромок у рабочих элементов (пуансона, матрицы) должны выбираться габаритные размеры, места размещения крепежных элементов и их параметры. Некоторые параметры определяются исходя из прочностных требований (например, толщина матрицы), другие задаются прототипом. К последним относятся, например, установочные габаритные размеры.

Практически все элементы пакета штампа (рис. 34) подлежат в той или иной степени подобному конструкторскому синтезу. Полученные расчетным путем размерные параметры элементов штампа должны быть оформлены в виде соответствующих чертежей. САПР формирует только чертежи оригинальных деталей пакета, а остальная часть чертежей прототипа хранится в библиотеке САПР либо в виде описания «слепышей», либо соответствующих стандартных процедур. Описание геометрии в форме «слепышей» является простейшим вариантом. Документация при этом выдается в форме чертежей с символьными обозначениями и таблиц, конкретизирующих эти символьные размеры (рис. 36). При наличии стандартных процедур чертежи по деталям прототипа выдаются в обычной форме, так же как чертежи оригинальных деталей штампа.



ДО	Н	Д	Д1	Д2	Н3	Н1	Н2
$3{,}65_{-0{,}008}$	36	$5^{+0{,}016}_{+0{,}008}$	$5_{-0{,}16}$	8	12	10	$4^{+0{,}1}$

Рис. 36. Чертеж (*а*) и таблица символьных размеров (*б*)

Аналогичным образом проектируются далее параметры деталей блока штампа. В отличие от оригинальной части пакета штампа, где главной задачей был синтез контуров рабочих частей штампа (пуансона и матрицы), при проектировании деталей блока главная задача связана с выбором параметров крепежа пакета с плитами блока.

Верхняя плита блока штампа подвижна, она связывается с нижней плитой направляющими колонками. Число и способ размещения колонок определены прототипом. Параметры этих колонок могут также являться предметом конструкторского синтеза. В задачах выбора параметров крепежа и под-

вижных соединений (колонок) определяются координаты размещения элементов, их размеры и точности посадок. Входными данными для решения этих задач являются габаритные и точностные параметры штампуемой детали, матрицы и пуансона-держателя.

Реализация в САПР рассмотренных выше методов синтеза штампов по прототипу возможна на основе использования интерактивных диалоговых режимов. Один из вариантов построения схемы диалогового проектирования (рис. 37) включает в себя следующую последовательность работ по проектированию штампа:

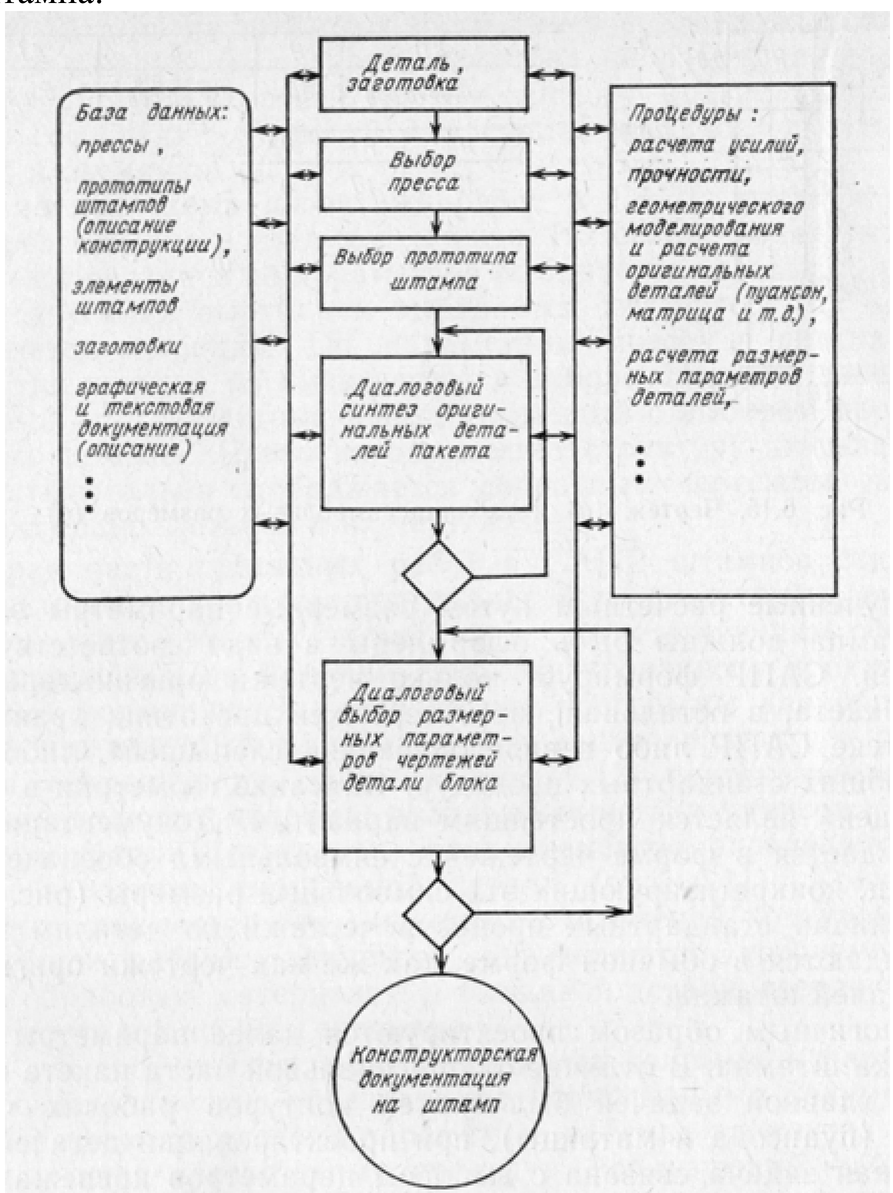


Рис. 37. Структура сценария диалогового автоматизированного конструирования штампа

1. Выбор пресса и прототипа штампа.
2. Синтез оригинальной части штампа.
3. Синтез параметров деталей штампа.

Входом процесса являются описания штампуемой детали и заготовки, которые включают помимо геометрических характеристик параметры обработки детали (допуска, точность) и характеристики материала заготовки. По описанию детали и заготовки с использованием процедур расчета потребных

усилий выбирается тип пресса. Далее система предлагает возможные варианты штампов, удовлетворяющие требованиям, из которых проектировщик выбирает лучший по его представлениям. На этом завершается первый этап проектных работ, связанный с выбором прототипа будущего штампа.

Каждому прототипу штампа соответствует определенная структура, отображенная в соответствующей совокупности заготовок чертежей, и сценарий, определяющий последовательность операций диалогового проектирования (последовательность кадров). Схема проектирования (рис. 37) при наличии станков с ЧПУ может дополняться блоками и процедурами синтеза управляющих программ для обработки всех или части деталей.